



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE ECONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM POLÍTICAS PÚBLICAS, ESTRATÉGIAS E
DESENVOLVIMENTO

Altino Silva Marques Junior

DESAFIOS EM POLÍTICAS PÚBLICAS PARA O DESENVOLVIMENTO DE
PROJETOS DE CAPTURA E ARMAZENAGEM DE CARBONO (CCS) NO BRASIL

Rio de Janeiro

2024

Altino Silva Marques Junior

DESAFIOS EM POLÍTICAS PÚBLICAS PARA O DESENVOLVIMENTO DE
PROJETOS DE CAPTURA E ARMAZENAGEM DE CARBONO (CCS) NO BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Políticas Públicas, Estratégias e Desenvolvimento da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Economia, como requisito à obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Helder Queiroz Pinto Junior

Rio de Janeiro

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

M357d Marques Junior, Altino Silva.
Desafios em políticas públicas para o desenvolvimento de projetos de
Captura e Armazenagem de Carbono (CCS) no Brasil / Altino Silva Marques
Junior. – 2024
79 f.

Orientador: Helder Queiroz Pinto Junior
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de
Economia, Programa de Pós-Graduação em Políticas Públicas, Estratégias e
Desenvolvimento, 2024.
Bibliografia: f. 73 – 79.

1. Políticas públicas. 2. Captura e Armazenagem de Carbono. 3. Captura
de carbono. 4. Transição energética. I. Pinto Junior, Helder Queiroz, orient. II.
Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto de Economia. III. Título.

CDD 320.6

Altino Marques

DESAFIOS EM POLÍTICAS PÚBLICAS PARA O DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS
DE CAPTURA E ARMAZENAGEM DE CARBONO (CCS) NO BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Políticas Públicas, Estratégias e Desenvolvimento da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Economia, como requisito à obtenção do grau de Mestre.

Rio de Janeiro, 24 de junho de 2024.

Prof. Dr. Helder Queiroz Pinto Junior
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Prof. Dr. Francisco José Mendes Duarte
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Prof^a. Dr^a. – Fernanda Delgado de Jesus
Associação Brasileira da Indústria de Hidrogênio Verde (ABIHV)

Prof. Dr. – Marcelo Colomer Ferraro
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

AGRADECIMENTOS

Agradeço...

À minha companheira, Tamara, por todo o apoio durante esta etapa e pela compreensão pelos finais de semana ensolarados que passamos em casa.

Ao Instituto de Economia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (IE-UFRJ), pela oportunidade de cursar o mestrado do programa de pós-graduação em Políticas Públicas, Estratégias e Desenvolvimento (PPED).

Ao meu orientador, Helder Queiroz Pinto Junior, por embarcar neste projeto e apoiar na mudança de tema (ainda bem que mudamos na fase embrionária).

Aos professores Marcelo Colomer e José Vitor Bomtempo, pelos conhecimentos compartilhados e que foram motivadores na escolha deste tema.

Aos membros da banca, professores (a) Francisco Duarte, Fernanda Delgado e Marcelo Colomer (de novo rsrs), que dedicaram vosso tempo para avaliarem a pesquisa.

Por fim e MAIS importante, agradeço à minha filha Mariana, que hoje não faz a menor ideia do que está acontecendo, mas tenho certeza de que ficará orgulhosa do pai no futuro...

RESUMO

A necessidade de enfrentar as mudanças climáticas e o aquecimento global tem impulsionado esforços globais em direção a uma economia de carbono zero. Para atingir esse objetivo, é fundamental realizar uma transição energética para fontes renováveis e de baixo carbono. No entanto, essa transição enfrenta desafios significativos, como a dependência atual de combustíveis fósseis e a necessidade de desenvolver novas tecnologias. A Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (Rio 92) e o Protocolo de Kyoto foram eventos importantes no estabelecimento de compromissos e obrigações para reduzir as emissões de carbono. Em 2015, a Conferência das Partes (COP) 21 resultou no Acordo de Paris, que estabeleceu a meta de limitar o aquecimento global a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais, tendo o Brasil assumido compromissos de reduzir as emissões de carbono em 53% até 2030. O Brasil possui características peculiares, com quase 45% da oferta interna de energia proveniente de fontes renováveis. Destaca-se também que o país é um grande produtor de biocombustíveis e petróleo. Esses fatores devem ser considerados na definição de políticas públicas para a redução de emissões. A captura e armazenamento de carbono (CCS) surge como uma estratégia importante na transição energética, pois ajuda a superar desafios como a ruptura de sistemas sociotécnicos e a necessidade crescente de energia. Para desenvolver o CCS no Brasil, é necessário avaliar o cenário atual de transição energética, identificar instrumentos de políticas públicas que contribuam para o fomento de projetos, considerar o arcabouço legal e regulatório existente, entender o que constitui um projeto de CCS e identificar os projetos existentes no país. Em complemento, a análise de outras realidades também pode contribuir para identificar lacunas e desafios já vividos por outros países e apresentar soluções que podem funcionar para o país. Através de fundamentação teórica, revisão do contexto histórico e atual do Brasil e da análise da política estadunidense e norueguesa, buscou-se avaliar os desafios em políticas públicas para o desenvolvimento do CCS no país, propondo elementos em políticas públicas que possam estimular e desenvolver o CCS no Brasil.

Palavras-chave: CCS; Captura de Carbono; Transição Energética; Políticas Públicas.

ABSTRACT

The necessity to confront climate change and global warming has propelled global efforts towards a carbon-neutral economy. Achieving this goal hinges on executing an energy transition towards renewable and low-carbon sources. Nonetheless, this transition encounters significant challenges, such as the current dependence on fossil fuels and the imperative to develop new technologies. The United Nations Conference on Environment and Development (Rio 92) and the Kyoto Protocol were pivotal events in establishing commitments and obligations to reduce carbon emissions. In 2015, COP-21 resulted in the Paris Agreement, which set the target of limiting global warming to 1.5°C above pre-industrial levels, with Brazil committing to reducing carbon emissions by 53% by 2030. Brazil possesses unique characteristics, with nearly 45% of its domestic energy supply sourced from renewables. Additionally, it is a major producer of biofuels and oil. These factors must be considered in shaping public policies for emission reduction. Carbon capture and storage (CCS) emerge as a crucial strategy in the energy transition, as it helps overcome challenges such as the disruption of socio-technical systems and the growing energy demand. Developing CCS in Brazil requires evaluating the current energy transition landscape, identifying public policy instruments that foster project development, considering existing legal and regulatory frameworks, understanding what constitutes a CCS project, and identifying existing projects in the country. However, analyzing other realities can also contribute to identifying gaps and challenges experienced by other countries and presenting solutions that may work for Brazil. Through theoretical foundation, a review of Brazil's historical and current context, and analysis of U.S. and Norwegian policy, the aim was to assess challenges in public policies for CCS development in the country, proposing elements in public policies that can stimulate and advance CCS in Brazil.

Keywords: CCS; Carbon Capture; Energy Transition; Public Policies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Projeto de armazenagem de CO2 de Sleipner, Noruega.....	45
--	-----------

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- 45Q – Seção 45 do Código da Receita Federal dos Estados Unidos
- ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
- BECCS – Bioenergia, captura e armazenagem de carbono
- CCS – *Carbon Capture Storage* (Captura e Armazenagem de Carbono)
- CCUS – Captura, Armazenagem e Utilização de Carbono
- CO₂ – Dióxido de Carbono
- COP – Conferência das Partes
- CRS – Serviço de Pesquisa do Congresso Norte Americano
- DAC – Captura de CO₂ Diretamente da Atmosfera
- EIA – *Energy Information Administration*
- EOR – *Enhanced Oil Recovery*
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética
- EUA – Estados Unidos da América
- IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás
- IEA – *International Energy Agency*
- IRENA – *International Renewable Energy Agency*
- MLP – Perspectiva multinível
- NDC – Contribuição Nacionalmente Determinada
- ONU – Organização das Nações Unidas
- OSPAR - Convenção para a Proteção do Meio Marinho do Atlântico Nordeste
- UE – União Europeia
- UNFCCC – Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	QUESTÃO CENTRAL, OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.1.1	Questão Central	13
1.1.2	Objetivo Geral.....	14
1.1.3	Objetivos Específicos	15
1.2	METODOLOGIA.....	15
2	CCS E A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA: APORTES CONCEITUAIS DE REGULAÇÃO E <i>POLICY MIX</i>	19
2.1	POLÍTICAS PÚBLICAS E <i>POLICY MIX</i>	24
2.2	ARCABOUÇO JURÍDICO-REGULATÓRIO NACIONAL	27
2.3	CONTRIBUIÇÃO NACIONALMENTE DETERMINADA E OS DESAFIOS PARA A DESCARBONIZAÇÃO	30
2.4	ASPECTOS TECNOLÓGICOS DO CCS NO BRASIL	34
3	PROGRAMAS DE CCS EM DESENVOLVIMENTO NO BRASIL: UMA COMPARAÇÃO COM OS CASOS DOS EUA E NORUEGA	36
3.1	PETROBRAS E CCS NA BACIA DE SANTOS E NO NORTE FLUMINENSE	39
3.2	PERSPECTIVAS PARA O DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS DE CCS NO BRASIL	41
3.3	NORUEGA E SLEIPNER: O PRIMEIRO PROJETO MUNDIAL EM GRANDE ESCALA.....	44
3.3.1	Cenário político dentro do contexto da CCS.....	45
3.3.2	O sucesso de Sleipner.....	47
3.3.3	Instrumentos de políticas públicas utilizados.....	49
3.4	OS EUA E A IMPLANTAÇÃO DO 45Q.....	50
3.4.1	Os instrumentos de política pública de suporte ao 45Q	52
3.4.2	Instrumentos de políticas públicas utilizados.....	55
4	DESAFIOS EM POLÍTICAS PÚBLICAS PARA O DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS DE CCS NO BRASIL.....	57
4.1	LACUNAS REGULATÓRIAS E INSEGURANÇA PARA INVESTIMENTOS	58
4.2	LIÇÕES DOS CASOS EUA E NORUEGA PARA EXAME DO CCS NO BRASIL	60

4.3	CONSTRUINDO UMA POLÍTICA PÚBLICA PARA O CCS NO BRASIL.....	64
	CONCLUSÃO.....	69
	REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

Um mundo árido, totalmente desequilibrado. Seca, temperaturas elevadas, florestas destruídas ou que sucumbiram às novas condições geoclimáticas. Atmosfera densa, lúgubre, cheiro de enxofre por todos os cantos e necessidade de utilização de máscaras. Calotas polares derretidas, aumento dos níveis dos oceanos, desequilíbrio na cadeia alimentar. Escassez de alimentos, fome e morte. Parece um roteiro de filme pós-apocalíptico, mas, recentemente, o mundo tem apresentado *spoilers* de como será esse filme a ser rodado num futuro e que impactará as próximas gerações.

Muito se discute sobre os ciclos climáticos terrestres e seus períodos de aquecimento e resfriamento já identificados pelos geólogos ao longo dos bilhões de anos de existência do planeta. Contudo, o planeta não é afetado apenas por ciclos climáticos. Obviamente, aceitar que toda a mudança climática existente e percebida é decorrente de um fenômeno cíclico e imutável facilitaria a compreensão e a aceitação humana para algo inevitável.

Em que pese a importância da discussão sobre tais ciclos, há evidências que indicam que o ser humano, ao longo dos últimos séculos, mais precisamente desde o início do período industrial, contribuiu e vem contribuindo para o desequilíbrio do planeta, acelerando o aquecimento global e, conseqüentemente, seus impactos.

A atividade industrial humana demanda a exploração de recursos terrestres, seja água, terra ou o próprio ar. Entretanto, os detritos desta atuação foram negligenciados por séculos e isso tem um preço. Os gases causadores do efeito estufa são um desses elementos deixados de lado ao longo do progresso humano. Tais gases possuem a capacidade de destruir a camada de ozônio, permitindo maior incidência dos raios solares, desequilibrando o ecossistema terrestre e impactando diretamente no clima global. O avanço das indústrias, aumento do consumo, maior extração de recursos naturais e o desmatamento de florestas podem ser atribuídos como potencializadores das mudanças climáticas.

Contudo, cabe destacar que esta pesquisa não é uma crítica à industrialização e ou ao progresso da humanidade. Indubitavelmente, os avanços industriais e tecnológicos permitiram que a civilização alcançasse o patamar atual. Tais avanços viabilizaram, ainda, a evolução no campo das ciências, melhorando a condição de vida e aumentando a expectativa humana.

Ao longo da década de 1990, as discussões referentes ao aquecimento global e às mudanças climáticas ganharam corpo. A preocupação saiu do campo acadêmico e começou a ocupar espaço na pauta geopolítica global. A realização da Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (Rio 92) foi um caminho sem volta. A partir deste

evento, a Organização das Nações Unidas instituiu a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC), que passou a conduzir as discussões mundiais acerca das mudanças climáticas.

Nas últimas três décadas, muito foi discutido sobre o tema. Em 2015, houve a assinatura do Acordo de Paris, documento em que as partes assumiram compromissos voluntários, através das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC's) para limitarem o aquecimento global a 1,5°C até o ano de 2030, quando comparado com a temperatura média no período pré-industrial. Porém, o que tem se observado é o aumento da temperatura global e pouco avanço nos compromissos firmados.

Para que as metas estabelecidas no Acordo de Paris sejam atingidas, alguns caminhos deverão ser repensados. As nações deverão reforçar seus compromissos e desenvolver soluções para a redução de emissões, mas enfrentando o desafio de manterem sua autonomia energética e a segurança no abastecimento. As alternativas de cada um dos países signatários do Acordo de Paris deverão ponderar condições econômicas internas, perfil energético, capacitação tecnológica, custo da solução pretendida, dentre outros aspectos específicos de cada uma das nações. Para que o discurso saia do papel e seja executado, políticas públicas precisarão ser bem definidas, de forma a atrair investimentos, mas também terão que ser eficazes, garantindo que os compromissos sejam cumpridos.

E este trabalho é sobre isso. No atual contexto, múltiplas soluções tecnológicas e energéticas concorrem, em diferentes países, como possíveis vetores de transformação dos padrões de produção e consumo de energia. Com o Brasil sob a lupa, esta pesquisa buscará elucidar quais os desafios do país na elaboração, não de todas, mas de uma política específica sobre uma solução que tem figurado na pauta das discussões como um caminho a ser trilhado e que permita a coexistência do consumo de combustíveis fósseis com a redução e neutralização de emissões de gases de efeito estufa: a captura e o armazenamento de carbono (CCS).

O CCS consiste num processo em que o dióxido de carbono (CO₂) é capturado de uma fonte emissora, que pode ser decorrente, por exemplo, da produção de petróleo, de uma unidade fabril, ou diretamente da atmosfera. Este CO₂ é comprimido e transportado para o local de armazenamento: formações geológicas, como um reservatório de petróleo depletado ou um reservatório salino (HASAN, *et al.*, 2022). Este armazenamento pode ser permanente, concluindo, assim, o processo de captura e armazenagem de carbono, objeto deste estudo, ou temporário, sendo denominado captura, armazenagem e utilização de carbono (CCUS). O CCS possui potencial para contribuir diretamente na diminuição dos gases causadores do efeito

estufa, seja pela remoção do CO₂ da atmosfera, seja por evitar que novos volumes de CO₂ sejam jogados nela.

Importante destacar que o CCS pode ter diversos motivadores, tais como (*International Energy Agency - IEA, 2023; MA, et al., 2022*):

- *Direct air capture (DAC)*: consiste no sequestro do CO₂ diretamente da atmosfera, não se concentrando em uma fonte emissora específica;
- *Bioenergy with carbon capture and storage (BECCS)*: bioenergia com a captura e armazenagem de carbono. Neste caso, o CO₂ é capturado diretamente no processo de produção de uma fonte de energia biogênica;
- *Enhanced oil recovery (EOR)*: a recuperação avançada de petróleo é o processo no qual o CO₂ é injetado em poços ativos para aumentar a produtividade;
- *Capture, Utilisation and Storage (CCUS)*: captura, armazenagem e uso de carbono. Trata-se do CCS com a adoção de uma etapa: a utilização do CO₂ armazenado. O uso pode ser dos mais diversos: desde fins industriais (indústria cimenteira, siderurgia etc.) à produção de combustíveis sintéticos através da conversão catalítica do CO₂ em metanol (*ALSUNOISI e KAYABASI, 2024*);
- Redução das emissões de CO₂ no processo de produção de hidrogênio através de matrizes fósseis, diminuindo a pegada de carbono e contribuindo para a utilização deste produto em processos de geração de energia de baixo carbono. (*HERMESMANN e MULLER, 2022; GANTER, et al., 2024*).

Destarte, através de uma análise qualitativa, esta pesquisa analisará o caso específico do Brasil, tendo como ponto de partida a captura e o armazenamento de carbono (CCS), assunto que, como será observado, está na pauta de discussões no Poder Executivo (em vários ministérios), no Congresso Nacional e na Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Como já mencionado, em que pese haver alguma sinergia entre os processos de CCS e CCUS, esta pesquisa considerará apenas o primeiro.

1.1 QUESTÃO CENTRAL, OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1.1.1 Questão Central

As mudanças climáticas e o aquecimento global são assuntos presentes nas discussões globais. A perseguição pelo *net zero* e a busca por soluções tecnológicas que viabilizem este objetivo fazem parte das pautas dos principais países industrializados, que almejam a redução

de suas emissões, sem prejudicar a segurança energética e o crescimento econômico individual de cada país.

Contudo, o acesso à tecnologia é restrito ou limitado, seja por conta da indisponibilidade de soluções em larga escala, seja pelo custo das soluções existentes ou, até mesmo, da dependência tecnológica de outras nações. A mudança para matrizes energéticas de baixo carbono pode alterar o contexto geopolítico atual, impactando a já citada segurança energética e o acesso à energia.

Neste contexto, soluções alternativas, que permitam a continuidade, mesmo que temporária, da utilização de matrizes energéticas de origem fóssil ou que colaborem para o abatimento de emissões dos setores industriais *hard to abate*¹ são essenciais para a manutenção da soberania e/ou competitividade econômica das nações, sendo o CCS uma destas potenciais soluções.

Para o Brasil, país que já possui parte de sua matriz energética composta por fontes de baixa emissão de CO₂ e que possui reservas e vocação para a indústria do petróleo, o CCS se mostra como uma alternativa a ser considerada para o atingimento das NDC's. Entretanto, o país possui, até o momento desta pesquisa, apenas um projeto em operação.

Assim, emana a questão central desta pesquisa: quais seriam os desafios a serem superados, em matéria de capacitação tecnológica e dotação institucional/regulatória, para implementar uma política pública com foco no desenvolvimento de projetos de CCS no Brasil?

Esta questão deverá ser tratada de forma abrangente, avaliando aspectos regulatórios, tecnológicos e setoriais. Os objetivos geral e específicos estabelecidos para esta pesquisa, elencados nas seções seguintes, contribuirão para elucidar esta questão.

1.1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo é demonstrar a existência de uma lacuna na política pública nacional para o desenvolvimento de uma economia de baixo carbono e avaliar os desafios para o desenvolvimento de uma política específica para o desenvolvimento de projetos de CCS no Brasil. Para que se atinja este objetivo, serão percorridos alguns objetivos

¹ Segundo IEA (2020, p. 22), atingir metas líquidas zero requer combater as emissões em todos os setores de energia, incluindo aqueles que às vezes são rotulados como “difíceis de diminuir” (*hard to abate*). Isso inclui a indústria pesada, responsável por quase 20% das emissões globais de CO₂, bem como viagens de longa distância pelos diversos modais de transporte, incluindo aviação, frete rodoviário e transporte marítimo. Nesses setores, as alternativas aos combustíveis fósseis são proibitivamente caras, como eletricidade para gerar calor extremo ou atualmente inviáveis, como aeronaves ou navios-tanque movidos a eletricidade.

específicos, que terão a função de contribuir para o melhor entendimento das questões que orbitam este assunto e delimitar a avaliação.

1.1.3 Objetivos Específicos

São objetivos específicos da dissertação:

- a) Estabelecer e referenciar o arcabouço legal e regulatório existente;
- b) Identificar os projetos de CCS existentes no Brasil;
- c) Avaliar o contexto sociopolítico e aplicabilidade dos modelos estadunidense e norueguês no contexto nacional;
- d) Apresentar as bases para a formulação de políticas públicas que poderão ser adotadas para estimular e desenvolver o CCS no Brasil.

1.2 METODOLOGIA

Os debates sobre a implementação de projetos de CCS não são novos, havendo alguns trabalhos acadêmicos publicados sobre o assunto, principalmente, no que tange à perspectiva da sociedade para este tipo de política pública. Entretanto, este é um tema cuja discussão ainda é embrionária no Brasil. A falta de um arcabouço jurídico-regulatório e das definições básicas dificultam o debate acerca das políticas públicas sobre o tema.

Segundo NEVES (1996), “a falta de exploração de um certo tema na literatura disponível, o caráter descritivo da pesquisa que se pretende empreender ou a intenção de compreender um fenômeno complexo na sua totalidade” são fatores que justificariam a adoção de uma abordagem qualitativa. Considerando a baixa maturidade da regulação vigente e a necessidade de maior compreensão dos efeitos de uma eventual política pública para desenvolvimento do CCS no país, será realizada uma pesquisa para analisar as relações entre as instituições (mercado, regulador, investidor e sociedade), a atuação do poder público, os mecanismos de incentivo e a sua influência nas expectativas da indústria para a implementação de projetos de CCS no país.

Quando se discute sobre pesquisas, dos tipos de abordagens metodológicas prevalecem: qualitativa e quantitativa. Entretanto, estes dois métodos não são excludentes entre si, mas complementares (NEVES, 1996). A escolha entre um dos métodos (ou a utilização dos dois métodos combinados) dependerá do tipo de análise que se quer fazer, o perfil do pesquisador e da disponibilidade de dados, dentre outros aspectos.

Para esta pesquisa, será adotada a abordagem qualitativa. Segundo GUNTHER (2006), a pesquisa qualitativa é uma abordagem exploratória que busca compreender o fenômeno estudado em profundidade, utilizando, principalmente, técnicas de coleta de dados como entrevistas, observação participante e análise de documentos, e técnicas de análise de dados como análise de conteúdo, análise de discurso e análise temática. Conforme explorado por RUEDA (1999), a pesquisa qualitativa permite a compreensão, da natureza da realidade social que envolve uma grande complexidade, sendo tal compreensão atingida através da observação das visões individuais e da análise de todo o processo.

Definido o método de pesquisa, é importante identificar como se classificará a pesquisa quanto aos fins e seus objetivos. Para este trabalho, será adotada a pesquisa explicativa. Segundo GIL (1999), as pesquisas explicativas visam identificar fatores que determinam ou concorrem para um determinado problema, buscando correlacionar a causa e efeito entre as hipóteses identificadas e o problema de pesquisa. Quanto aos meios serão utilizadas a pesquisa bibliográfica e a pesquisa documental, a saber:

- (i) Pesquisa bibliográfica: foi realizada a revisão literária de artigos científicos nas plataformas *Science Direct* e Periódicos Capes. A pesquisa teve como marco temporal inicial o ano de 2015. Este marco foi estabelecido após comparar o resultado da busca sem limitação de prazo com o resultado obtido após limitar o prazo, identificando que aproximadamente 80% dos trabalhos foram publicados após 2015. Esta limitação garante a atualidade do tema. De forma geral, foram utilizadas as seguintes palavras-chave: CCS (CCUS), *regulation*, *energy transformation*, *Brazil*. Para a análise regulatória, também foi adotada a pesquisa de doutrinadores reconhecidos
- (ii) Pesquisa documental: foi realizada em complemento à pesquisa bibliográfica, buscando trazer dados setoriais e debates institucionais sobre o tema. Foram consideradas publicações recentes da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), IEA, Empresa de Pesquisa Energética (EPE), CCS Brasil², entre outras instituições.

² Organização sem fins econômicos com a missão de promover a cooperação entre academia, governo, financiadores, indústria e sociedade para o desenvolvimento das atividades de Captura e Armazenamento de Carbono no Brasil (CCS Brasil, 2023)

Em complemento às pesquisas bibliográfica e documental, foi realizada uma análise comparativa entre as políticas públicas estadunidense (Estados Unidos da América - EUA, 2023)³ e norueguesa para desenvolvimento de projetos de CCS e como tais políticas podem ser uma referência para o modelo brasileiro.

A escolha destas duas políticas deve-se pelos seguintes fatores: (i) os EUA são os maiores produtores de petróleo no mundo (*Energy Information Administration - EIA*, 2023); (ii) os EUA são o país com a maior quantidade de projetos de CCS em operação ou em desenvolvimento (LORIA e BRIGHT, 2021); (iii) o aumento na quantidade de projetos de CCS em desenvolvimento nos EUA é, em parte, atribuída à publicação do 45Q, seção 45 do Código da Receita Federal dos Estados Unidos, que dispôs sobre a concessão de créditos tributários para empresas que armazenassem o CO₂ (FAN *et al.* 2019; LORIA e BRIGHT, 2021); (iv) o campo de SLEIPNER, na Noruega, foi o primeiro projeto dedicado de CCS em larga escala no mundo, tendo iniciado a operação em 1996 (MEADOWCROFT e LANGHELLE, 2009), sendo um marco e referência de projeto de CCS no mundo. A análise empírica buscou evidências que elucidariam o problema de pesquisa e viabilizariam a utilização prática deste trabalho.

Para o estudo das políticas dos EUA e da Noruega, foram utilizadas as seguintes palavras-chave na revisão bibliográfica na base de dados da *Science Direct*: (i) para EUA: CCS (CCUS), *regulation, framework, Q45*; (ii) para Noruega: CCS (CCUS), *regulation, framework, Sleipner*.

Desta forma, através de fundamentação teórica, revisão do contexto histórico e atual do Brasil e análise da política estadunidense e norueguesa, buscou-se avaliar os desafios em políticas públicas para o desenvolvimento do CCS no país.

Cumprir reforçar que a análise esmiuçada do arcabouço jurídico-regulatório não fez parte do escopo desta dissertação. De mesmo modo, este trabalho não pretende se aprofundar em avaliações econômicas e de custo x benefício, devendo ser objeto de estudo posterior.

Isto posto, esta dissertação terá a seguinte estrutura:

- **Capítulo 2:** abordará o tema de forma conceitual, nivelando conceitos necessários para a compreensão do trabalho. Aspectos sobre a teoria da regulação e do *policy mix* também serão percorridos;

³ Introduzido pela primeira vez em 2008, a Seção 45Q do Código da Receita Federal dos Estados Unidos fornece um crédito fiscal para o armazenamento de CO₂. A política destina-se a incentivar a implantação de captura, utilização e armazenamento de carbono.

- **Capítulo 3:** Buscará entender os motivadores para os projetos de CCS no Brasil e como as políticas públicas dos EUA e da Noruega contribuíram para o desenvolvimento do CCS nestes países;
- **Capítulo 4:** Identificará os principais gargalos e compilará informações necessárias para guiar a formulação de políticas públicas voltadas para o desenvolvimento de projetos de CCS no Brasil.
- **Conclusão:** Irá sumarizar aos principais resultados da pesquisa

Por fim, esperar-se-á que esta pesquisa contribua para direcionar o *policy maker* no desenho de uma política pública específica para o CCS, não considerando apenas aspectos técnicos, mas também aspectos sociais e políticos.

2 CCS E A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA: APORTES CONCEITUAIS DE REGULAÇÃO E *POLICY MIX*

As mudanças climáticas, o aquecimento global e a poluição ambiental têm direcionado esforços globais para uma economia de carbono zero. Para se atingir este objetivo, é inegável que a sociedade deverá ser conduzida para uma transição energética para matrizes renováveis e/ou de baixo carbono. Para se ter êxito nesta transição, será necessário vencer uma matriz energética atual fortemente dependente de. Além disso, será necessário estruturar políticas públicas que fomentem uma transição energética, sem ameaçar o suprimento e a autonomia de energia dos países e que considerem as vocações energéticas e aspectos socioeconômicos regionais.

A crescente demanda energética, somada aos avanços tecnológicos e à descoberta de novas reservas fizeram com que os preços das fontes energéticas de origem fóssil caíssem nos últimos anos, tendência que deve ser observada e mantida na próxima década, uma vez que o clamor pela descarbonização e o desenvolvimento de matrizes renováveis ou de menor emissão de CO₂ devem estimular a busca por antecipação das receitas provenientes da comercialização destes produtos, forçando o aumento da demanda por estes combustíveis (HELM, 2016). Ademais, o incremento da necessidade energética da China, Europa, EUA e África tendem a exigir um crescimento no consumo de carvão e de outras matrizes fósseis, uma vez que as tecnologias para fontes de energias renováveis ou ainda são de alto custo, comparada com os combustíveis fósseis, ou não estão completamente democratizadas. Este cenário dificulta a transição energética para um cenário *net zero*.

Para viabilizar esta transição, organismos como a *International Renewable Energy Agency* - IRENA (2019) e IEA (2021) entendem que a sociedade e a economia global deverão passar por uma transformação. Os avanços tecnológicos devem guiar para um mundo eletrificado⁴. Contudo, a eletrificação global deverá ser bem pensada, uma vez que a queda do preço dos combustíveis fósseis poderá dificultar este objetivo.

HELM (2016) leciona que o fim da era das *commodities* e o baixo preço dos combustíveis fósseis poderiam induzir a um aumento da demanda por estes combustíveis. Sem uma forma de frear esta demanda, seria inviável uma transição para a eletrificação, essencial para a transição energética. Também pontua que a única forma de se permitir a continuidade

⁴ No contexto desta pesquisa, o conceito de eletrificado deve ser entendido como o fornecimento de energia elétrica por matrizes limpas, como, por exemplo, mas não se limitando, às alternativas hídrica, eólica, solar, biomassa, hidrogênio verde.

dos combustíveis fósseis seria através de políticas de *carbon capture and storage* (CCS). Nesta esteira, LIPPONEN, *et al.* (2017) ponderam que a própria IEA considera que o CCS terá um papel importante na redução das emissões para o atingimento das metas climáticas, uma vez que os projetos de CCS possuem um potencial de contribuir com até 12% da meta global de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa.

HELM e HEPBURN (2019) sustentam que a atual dependência de energia fóssil dificulta a descarbonização. Sem incentivos a uma transição energética, a situação persistirá. IRENA (2019) reforça que o desenvolvimento de matrizes renováveis só será possível com: (i) redução dos custos de desenvolvimento e implementação; (ii) estabelecimento de metas para energia renovável; (iii) foco na solução dos problemas relacionados com a poluição e mudanças climáticas; (iv) inovação tecnológica; (v) envolvimento de agentes privados e corporações; e (vi) alinhamento com a opinião pública.

De maneira pragmática, HELM e HEPBURN (2019) citam que a transição energética deve ser uma força motriz para o desenvolvimento econômico. Reforçam que os sistemas de energia têm dupla função: (i) atender a demanda dos setores econômicos; e (ii) permitir o crescimento econômico, ao viabilizar o avanço tecnológico.

Já IRENA (2019) indica que alguns aspectos deverão ser endereçados nesta jornada pela transição energética, entre eles: (i) surgimento de novos empregos e extinção de outros; (ii) impacto econômico pela antecipação do abandono de alguns ativos de capital intensivo investido; (iii) reflexos da mudança climática na disponibilidade de água, comida e energia; e (iv) democratização da energia. Aspectos adicionais são abordados por HELM (2016), tais como uma política para o esgotamento dos insumos de origem fóssil já provados, e consequente aumento das emissões no curto prazo causadas pela antecipação da demanda deste tipo de combustível, e a necessidade de investimentos em pesquisa e desenvolvimento.

Outrossim, a transição energética poderá gerar impactos financeiros nos países, uma vez que muitas nações ancoram suas receitas na tributação dos combustíveis fósseis, o que demandaria eventual reforma tributária. Há a necessidade de criação de políticas públicas que sejam flexíveis, conforme a evolução tecnológica aconteça, mas que, ao mesmo tempo, tragam estabilidade para os investidores.

Assim, resta claro que os desafios para o estabelecimento de uma agenda para a transição energética são grandes. Aspectos locais e geopolíticos deverão ser considerados. Uma pauta míope, que considere apenas o foco na descarbonização e deixe de lado a garantia ao suprimento energético e a competitividade poderá gerar distorções globais e inviabilizar o *net zero*. Por mais que a necessidade de redução de emissões de carbono e criação de mecanismos

de captura sejam um consenso mundial, esperar que apenas o setor empresarial tome iniciativas benevolentes é irrazoável. É preciso adotar políticas que incentivem a descarbonização. Da mesma forma, transferir para outras nações processos e atividades de grandes emissões (indústrias, alimentação etc.) não auxilia na resolução da questão, uma vez que os impactos são sentidos em escala global. HELM (2021) defende que os poluidores devem pagar pela poluição causada. Contudo, para que isso ocorra, é necessário que as diversas políticas de subsídios aos combustíveis fósseis existentes caiam, de tal forma que os preços das fontes energéticas sejam vistos de maneira transparente e nas mesmas bases. Somando-se a isso, uma política de precificação do carbono permitiria que fontes de energia mais limpas se tornassem também mais competitivas.

Para uma transição sustentável, tais preocupações deverão estar na pauta do *policy maker*. Nesta esteira, a abordagem de LINDBERG *et al.* (2019) para os caminhos de transição também pode ser bem útil. Tal abordagem ensina-nos que a adoção de mix de políticas, com a definição dos graus de sustentabilidade e de disruptividade podem contribuir para uma transição estruturante dos modelos existentes e consolidação de novos regimes, com maior ênfase na sustentabilidade.

Neste contexto futuro e global, deve-se localizar e avaliar o Brasil. Aproximadamente, 45% da oferta energética nacional é decorrente de fontes renováveis (EPE, 2022). Contudo, o país possui forte vocação para produção de petróleo e gás natural, colocando-o em posição favorável na supremacia energética mundial. Ignorar tais condições seria o mesmo que desperdiçar uma vantagem competitiva dentro de um contexto geopolítico globalizado. Deste prisma, o CCS surge como grande potencial para o país.

Segundo a CCS BRASIL (2023), o potencial de captura e armazenagem de CO₂ para o setor de energia corresponde a 32% das emissões do setor, ou 130 M tCO₂. Além disso, pode ser utilizado como aliado no abatimento de emissões dos setores considerados *hard to abate*. Este mercado de captura de carbono, se aliado a uma política de precificação de carbono tem um potencial de gerar receitas na ordem de 14 bilhões de dólares por ano⁵ (CCS BRASIL, 2023).

O estudo proposto possui significativa importância, uma vez que discutirá um tema de grande impacto no cenário socioeconômico-ambiental global e que afeta não apenas os agentes que atuam diretamente no mercado, mas a sociedade como um todo. Destacam-se, ainda, a

⁵ Este cenário considera a precificação do crédito de carbono a USD 70,00/tonelada de CO₂.

existência de dois projetos de lei^{6,7} tramitando no Congresso Nacional que visam à criação do arcabouço jurídico sobre o tema e a deliberação⁸ da diretoria colegiada da ANP na Reunião de Diretoria nº 1.127 de 23 de novembro de 2023 determinando a execução de estudo de implementação do marco regulatório de CCS, evidenciando a importância e atualidade do tema.

Nesse contexto, a CCS emerge como uma abordagem promissora para reduzir a concentração de CO₂ na atmosfera e atenuar os impactos adversos das mudanças climáticas. A necessidade em se construir novas alternativas para o atingimento das metas de redução de emissões e limitação do aquecimento global ensejará uma visão holística do problema. A ampliação de projetos de CCS será necessária para que o compromisso de limitar o aquecimento global a 1,5°C seja alcançado pelos países signatários do Acordo de Paris (ARLOTA e MEDEIROS COSTA, 2021).

Aliás, o CCS exercerá função importante para aqueles setores *hard to abate*, permitindo uma redução significativa das emissões na siderurgia, indústria cimenteira e indústria química em geral (NOGUEIRA, *et al.* 2022). Notoriamente, o CCS não deve ser considerado como a única solução na trilha pelo *net zero*, mas deve ser trabalhado conjuntamente com a busca por processos mais eficientes e por fontes de energias renováveis viáveis. A necessidade de se avançar em uma matriz energética mais limpa e em novas tecnologias é essencial para o atingimento das metas, uma vez que o CCS tem potencial de contribuir com apenas 12% da redução de emissões necessárias até 2050 (LIPPONEN, *et al.* 2017).

Em linhas gerais, a CCS refere-se ao processo de separar o CO₂ proveniente de fontes industriais, como usinas de energia a carvão e indústrias químicas, antes de ser liberado na atmosfera. Após a captura, o CO₂ é direcionado para processos de armazenagem, que visam confinar o gás em reservatórios geológicos, como reservatórios salinos e formações de rochas sedimentares (SHU, *et al.* 2023; DÜTSCHKE, *et al.* 2016). HASAN, *et al.* 2012 complementam

⁶ Projeto de Lei 1.425 de 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.

⁷ Projeto de Lei 4.516 de 2023, que dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono, o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação, o Programa Nacional de Diesel Verde e o marco legal da captura e da estocagem geológica de dióxido de carbono

⁸ Processo: 48610.235448/2023-95 - Assunto: Estudo de implementação do marco regulatório de CCUS. - Unidade Autora: Superintendência de Tecnologia e Meio Ambiente (STM) - Diretor-Relator: Daniel Vieira - Deliberação: A Diretoria, considerando o constante no processo nº 48610.235448/2023-95, e com base no Despacho de Proposta para Deliberação da Diretoria nº 4/2023/STM-CMA/STM e na Nota Técnica nº 6/2023/STM-CMA/STM/ANP-RJ, decidiu por unanimidade, determinar a execução de estudo de implementação do marco regulatório de CCUS, a ser coordenado pela STM com o apoio das unidades organizacionais pertinentes (SAG, SDT, SSO, SDP, SIM, SPC, SBQ e outras identificadas no decorrer do estudo), submetendo a respectiva Nota Técnica conclusiva à Diretoria Colegiada em cento e vinte dias a contar da publicação da presente deliberação.

que reservatórios de petróleo e gás natural depletados também podem ser utilizados para a armazenagem de CO₂.

A implementação bem-sucedida da captura e armazenagem de carbono também depende da disponibilidade de infraestrutura adequada. É crucial desenvolver uma rede de transporte suficiente para garantir que o CO₂ se desloque do ponto de captura até o local de armazenamento, que, em muitos dos casos, demandará a construção de dutos e sistemas específicos para o transporte. A capacidade de transporte de CO₂ é um fator limitante na implementação eficaz da captura e armazenagem de carbono. Desenvolver sistemas de transporte eficientes e sustentáveis é essencial para viabilizar projetos de CCS em larga escala.

Assim como uma infraestrutura adequada, a efetividade da implementação do CCS dependerá da aceitação pública, que desempenha um papel crucial no sucesso da captura e armazenagem de carbono. Compreender as percepções e preocupações da sociedade em relação a essa tecnologia é essencial para moldar políticas eficazes e promover projetos de CCS.

Alguns artigos indicam que a transparência, participação pública e a comunicação eficaz são fundamentais para ganhar a confiança da comunidade. Segundo DÜTSCHKE, *et al.* 2016, a aceitação de projetos de CCS tem conexão com a fonte de CO₂ a ser capturado. Por exemplo, projetos de CCS relacionados com geração de energia através de carvão tendem a ser menos aceitos do que projetos de CCS relacionados a fontes renováveis ou à indústria de bens de consumo.

Outro ponto importante na aceitação de projetos de CCS está relacionado a maturidade das políticas públicas sobre o tema. A ausência de uma política pública definida, ou o seu baixo grau de maturidade, tende a impactar negativamente na percepção da sociedade, conforme apontado por HAUG e STIGSON (2016). A aceitação social é crucial para a viabilidade e implementação dos projetos de CCS (PEREIRA SILVA e MEDEIROS COSTA, 2021). Apenas com a participação pública, a percepção positiva e a aceitação da comunidade é que um projeto de CCS conseguirá ter legitimidade e força para ser implementado.

Outro aspecto relevante é o desenvolvimento de incentivos econômicos e regulamentações adequadas para impulsionar a implementação da CCS. A redução dos riscos relacionados aos projetos de CCS é um elemento crítico para o seu desenvolvimento (ARAÚJO, *et al.* 2021). Mecanismos de precificação de carbono, como taxas sobre emissões e sistemas de *cap-and-trade*⁹, podem desempenhar um papel crucial na promoção da CCS como uma

⁹ GODOY e SAES, 2015, p. 1: Mecanismo de mercado de carbono que estabelece limites de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) às empresas, e baseia-se em licenças para poluir

alternativa viável e economicamente atrativa na redução das emissões de CO₂, aumentando a previsibilidade para projetos e reduzindo o risco.

Nitidamente, a sociedade passa por um momento transitório. Uma economia tradicionalmente baseada no consumo energético de fontes de carbono se vê pressionada a migrar para uma economia de baixo carbono.

Esta mudança pode ser caracterizada com uma transição tecnológica, visto que esta transição só será viável com a ascensão de novas tecnologias, já existentes, mas de baixa escala ou alto custo, ou ainda a serem inventadas.

Na visão de GEELS (2002), uma transição, seja ela tecnológica, política, econômica, cultural, dentre outras, deve ser contemporizada pela mudança de regimes sociotécnicos¹⁰. MARKARD et al. (2012) compartilham deste tipo de visão, entendendo que deveriam ser estudados os regimes sociotécnicos, uma vez que a evolução tecnológica não se limita a apenas um segmento, mas envolve toda uma gama de atores, redes, instituições, materiais e conhecimento.

Na era atual, esta transição sociotécnica vem conectada com a preocupação pela sustentabilidade. MARKARD et al. (2012) cita que a dependência entre diversos setores são fatores críticos para uma transição sustentável. Há a clara preocupação de que novos modelos tecnológicos devem perseguir modelos mais sustentáveis de produção e consumo. Desta forma, há uma grande preocupação dos *policy makers* em como se garantir uma efetiva transição sustentável. A transição energética, ou melhor, a transição para uma sociedade de baixo carbono demandará o desenvolvimento de políticas públicas específicas e de um ambiente regulatório adequado, de forma a conciliar a necessidade por matrizes de baixo carbono com a vocação de cada uma das nações.

Para o melhor entendimento do papel do CCS nesta transição energética no Brasil, este capítulo se iniciará com uma abordagem conceitual sobre políticas públicas e regulação, conectando tais aspectos com o compromisso brasileiro de redução de emissões assumido através das NDC's, as perspectivas para o desenvolvimento de projetos de CCS no país e aspectos tecnológicos necessários para o desenvolvimento de tais projetos

2.1 POLÍTICAS PÚBLICAS E POLICY MIX

¹⁰ Para esta pesquisa, considerar-se-á a definição de regime sociotécnico aventada por GEELS (2002, p. 1260): conjunto semi-coerente de regras adotado por diferentes grupos sociais

BIRKLAND (2020) esclarece em seu livro que não há um conceito pacificado sobre o que seja uma política pública, mas que há certo consenso sobre um atributo que ela deve possuir: a política pública deve ser uma resposta do governo para um problema de interesse público. De acordo com KRAFT e FURLONG (2018), um problema de interesse público é aquele em que a população entende que uma determinada condição é inaceitável e, logo, demanda intervenção. Assim, esta intervenção seria uma política pública.

As políticas públicas são a externalização do governo sobre um determinado problema público. Em outras palavras, uma política pública pode ser interpretada como a forma de um governo – representante do povo – atuar sobre as dores de seus representados. O termo política pública está relacionado às ações do governo e às intenções que levaram o governo a tomar tais ações (BIRKLAND, 2020).

Uma política pública deve corrigir um problema público. Estes problemas podem ser oriundos de falhas de mercado, falhas de governo e falhas que limitem a competição que não se caracterizam como falhas de mercado ou de governo (WEIMER e VINING, 2017). Falhas de mercado ocorrem quando as ações dos agentes de um determinado mercado falham ao encontrar a eficiência de Pareto¹¹. Nesta hipótese, o aumento do benefício de uns (indivíduo, grupo ou setor) gerará, obrigatoriamente, prejuízos para outros. As falhas de governo ocorrem quando as próprias ações dos governantes, ou a estrutura de governos e instituições, contribuem para a falha da promoção do bem-estar social. Já o terceiro tipo de falha, está relacionado com fatores que limitam a competição, mas que não se enquadram especificamente nas duas alternativas anteriores. Este tipo de falha está intimamente ligado ao tamanho e interesse dos mercados, dinâmicas macroeconômicas e problemas de incertezas.

Há diversas formas de uma política pública se manifestar. No quadro abaixo (Quadro 1), observa-se a existência de cinco principais instrumentos de políticas públicas (KRAFT e FURLONG, 2018). Contudo, o instrumento a ser adotado dependerá de qual o grau de intervenção o governo adotará para determinado problema. Por exemplo, a solução não precisa ser sempre regulatória, podendo vir diretamente dos setores interessados. O custo de uma regulação, ou a ausência dela, pode ser tão alto, que o próprio mercado se regula. Desta forma, cabe ao governo avaliar os mercados e os interessados e estudar soluções mais efetivas (VELJANOVSKI, 2010). Neste sentido, políticas de incentivos, preços e tributárias poderiam ser mais eficientes do que uma regulação de comando e controle, por exemplo.

¹¹ Eficiência de Pareto: estado de alocação de recursos em que é impossível realocá-los tal que a situação de qualquer participante seja melhorada sem piorar a situação individual de outro participante (WEIMER e VINING, 2017, p. 125)

Quadro 1 – Instrumentos de políticas públicas

Instrumento	Ação
Regulação	Mecanismo governamental que cria regras para uma determinada atividade, situação ou problema, restringindo, liberando ou demandando ações dos indivíduos
Gestão Pública	Implementação de serviços ou gestão de recursos pelo poder público
Educação, informação e persuasão	Educar ou informar os cidadãos de forma a impedi-los de atuarem de determinada maneira
Taxação e gastos	Recolhimento ou gasto financeiro para viabilizar metas
Mecanismos de mercado	Utilizar o mercado para solucionar problemas públicos, através de incentivos

Fonte: Elaboração própria com base em KRAFT e FURLONG (2018).

Todavia, uma política pública não deve se ater necessariamente a um único e específico instrumento. Considerando o aspecto da inovação, LINDBERG, *et al.* (2019) citam que políticas públicas podem promover ou proteger inovações, mas também teriam o poder de restringir tecnologias existentes. Assim, o desenvolvimento de uma perspectiva de um mix de políticas, ou seja, a combinação de diversos instrumentos das políticas públicas poderia contribuir para uma transição de um sistema sociotécnico, uma vez que este mix teria o papel de suportar o processo de mudança dos regimes existentes para um novo regime. Mesmo entendimento é compartilhado por KERN *et al.* (2019), ao afirmarem que a política para inovação deve ser vista sob uma lente de um mix de políticas, de forma a não apenas prever falhas de mercado, mas para atuar sobre falhas estruturais e transformacionais. Entretanto, os próprios autores colacionam que o desenvolvimento de um *policy mix* para uma transição sustentável entre regimes e/ou sistemas sociotécnicos é particularmente desafiador, uma vez que: (i) estão em mais de um domínio; e (ii) há grande incerteza sobre futuro, direção e complexidade das mudanças necessárias.

Os caminhos de uma transição se desenrolam como resultado de lutas contínuas de atores sobre objetivos e instrumentos de políticas públicas, de forma a influenciar os graus de sustentabilidade e de disruptividade de um mix de políticas, permitindo a ruptura de sistemas sociotécnicos vigentes. De mesmo modo, SCHOT e STEINMUELLER (2018) defendem que a transformação de sistemas sociotécnicos é bem diferente do desenvolvimento de novas tecnologias radicais, como, por exemplo, a mudança da política de mobilidade de um país versus o desenvolvimento de carros elétricos. Como já citado, para SCHOT e

STEINMUELLER (2018), a transição sustentável deve ser inclusiva, experimental e direcionada para mudanças de sistemas sociotécnicos.

Nesta esteira, GEELS (2002), ao trazer para a comunidade científica o conceito de perspectiva multinível (MLP), destaca que o avanço tecnológico não é papel apenas de engenheiros, mas também depende de como as políticas públicas serão conduzidas para fomentar e sustentar tais avanços. De forma sintética, GEELS (2002) avalia que a tecnologia tende a percorrer níveis, até que se consolide no mercado. Seria uma novidade nascida em um nicho, que se propagaria em regimes sociotécnicos distintos até perfurar um bolha e se consolidar na sociedade. Em outras palavras, a ruptura de modelos pré-existentes ocorrerá apenas com o desenvolvimento de novas soluções em nichos específicos, que ganhariam espaço e se consolidariam em grupos sociais, demandando a alteração de seus regimes sociotécnicos e que, por fim, fariam parte da paisagem desta sociedade.

A quebra de paradigmas depende fortemente da construção de políticas públicas que permitam o surgimento e teste de novos modelos. Segundo FREEMAN e PEREZ (1988), há uma tendência das instituições sociais se acomodarem diante de um cenário de estabilidade. Por outro lado, a combinação adequada de políticas públicas tem a capacidade de incentivar o desenvolvimento de novos paradigmas, permitindo que tais instituições aceitem um novo cenário e encontrem uma nova estabilidade até que haja uma necessidade futura de quebra deste novo paradigma instituído.

Notoriamente, quando se discute o tema transição energética, a avaliação do conceito de políticas públicas é de suma importância. Como já mencionado, a política pública tem o papel de resolver um problema público e o poder de construir caminhos para o desenvolvimento de soluções. O CCS pode ser posicionado como uma ferramenta contribuindo com a mudança do sistema sociotécnico existente. No contexto atual, não há uma política pública agressiva para redução das emissões de CO₂ no país. Ademais, a ausência de instrumentos formais, tais como um arcabouço regulatório, políticas de taxação efetivas e incentivos ao mercado tendem a se mostrar como fatores opostos ao desenvolvimento de projetos de CCS no país.

2.2 ARCABOUÇO JURÍDICO-REGULATÓRIO NACIONAL

A regulação é, talvez, o mecanismo de políticas públicas mais conhecido pela sociedade. Como debatido anteriormente, a regulação é uma das formas de materialização de uma política pública. Através de diferentes ações governamentais, incluindo as leis promulgadas pelas legislaturas e as regras adotadas pelas burocracias, obrigam os cidadãos a

fazerem algo ou os impedem de fazê-lo. Conforme abordado por KRAFT e FURLONG (2018), a regulação é um mecanismo governamental que cria regras para uma determinada atividade, situação ou problema, restringindo, liberando ou demandando ações dos indivíduos.

Ao contrário do senso comum de que a regulação serve apenas para restringir comportamentos ou prevenir atividades indesejadas, BALDWIN, *et al.* (2012) descrevem que a regulação pode ser um instrumento para permitir ou facilitar o desenvolvimento de mercados ou a execução de políticas públicas. A regulação tem um papel fundamental na quebra e construção de novos paradigmas, permitindo que cenários de acomodação social sejam mexidos ou, na outra extremidade, buscando a estabilidade das instituições (FREEMAN e PEREZ, 1988). Contudo, para que a regulação atue como um instrumento positivo, ou seja, que permita tal desenvolvimento, alguns problemas regulatórios precisam ser identificados e tratados.

Os principais problemas regulatórios atuais envolvem a governança dos órgãos reguladores, os efeitos e preconceitos derivados dos regimes regulatórios existentes e o surgimento de novas tecnologias e produtos. Nesta mesma esteira ensina VELJANOVSKI (2010), esclarecendo que o arcabouço jurídico-regulatório deve sempre buscar a eficiência e eficácia das regras e padrões, mantendo uma coerência entre o objetivo regulatório e o instrumento jurídico utilizado. Um conjunto de regras e padrões eficientes minimiza o somatório de custos e perdas para a sociedade, através do seu uso apropriado e de sua efetividade.

Um dos principais desafios atuais é de como os mercados conseguirão atrair e competir pelos investimentos para novos projetos de infraestrutura. Sob este prisma, melhores práticas jurídico-regulatórias deverão ser observadas, garantindo, principalmente, transparência, previsibilidade e participação dos agentes envolvidos. As diretrizes regulatórias assumem papel central no desenvolvimento dos mercados, sendo fatores críticos para a tomada de decisão dos investidores, que comparam os diversos mercados e setores, além de avaliarem a percepção de risco internacional, confiança nas instituições, condições gerais da economia, fatores de mercado (tais como insumos, custo de mão de obra e disponibilidade de recursos), condições básicas da indústria (oferta e demanda) e políticas regulatórias (BERG, 2001). Todavia, o arcabouço regulatório deve ter a capacidade de acomodar pressões por mudanças disruptivas e empregar formas de poder institucional, garantindo que as mudanças que ocorrem nas configurações sociotécnicas não interrompam as relações sociais predominantes e as distribuições de poder político (TILSTED, *et al.* 2022).

Para guiar a construção de uma regulação, algumas estratégias podem ser utilizadas. BALDWIN, *et al.* (2012) relacionam os principais modelos regulatórios que estão à disposição

dos *policy makers*. Lecionam que a escolha da estratégia (ou de uma combinação de estratégias) é de suma importância, uma vez que é difícil se justificar uma decisão regulatória quando se evidencia que outra estratégia traria resultados mais promissores. Dentre as principais estratégias apresentadas, encontram-se:

- Comando e controle: imposição de padrões e regras sustentados por penalidades e sanções;
- Regimes baseados em incentivos: utilização de encargos financeiros ou incentivos econômicos para “incentivar” o agente regulado. Diminui a discricionariedade do regulador se os critérios são objetivos;
- Controle do aproveitamento de mercado: tem por objetivo criar meios regulatórios que incentivem a competição e restrinjam as práticas anticompetitivas;
- Regulação por divulgação: apesar de não ser muito intervencionista, tem como dificuldades a acurácia, o acesso e a disponibilidade das informações em tempo adequado;
- Ações diretas/Desenvolvimento de solução: atuação direta do governo para a solução do problema, podendo ser, posteriormente, transferido para o controle do setor privado;
- Direitos e responsabilidades: uma forma menos intervencionista do C&C. Em vez de padrões, são estabelecidos direitos e obrigações que, se violados, importarão nas penalidades previstas;
- Compensação pública/ “seguro” social: uma forma de incentivo, através da definição de metas e prêmios por desempenho.

A estratégia regulatória a ser adotada dependerá do grau de intervenção que se queira dar e da maturidade dos agentes públicos. DASSLER (2005) discorre que, quanto à intervenção, a regulação pode ser direcionada ao mercado, ou seja, buscar o desenvolvimento econômico através da competição, e direcionada ao público, quando o regulador visa ao atendimento do interesse público e social, mesmo que, para isso, tenha que recorrer a alternativas que tenham reflexos anticompetitivos.

Para o desenvolvimento de um arcabouço regulatório que incentive o desenvolvimento de novos projetos, alguns aspectos deverão ser levados em consideração. A estratégia para regular dependerá, prioritariamente, de qual objetivo se queira atingir com a regulação, do momento econômico-social brasileiro e do perfil dos agentes regulados.

No cenário de transição para uma economia de baixo carbono, os países em desenvolvimento assumirão um papel cada vez mais importante na mitigação das mudanças climáticas, visto que há uma tendência de as grandes economias manterem os níveis atuais de

emissão, ao passo que, nos próximos anos, os níveis de emissões nos países em desenvolvimento devem aumentar (NETTO, *et al.* 2020).

Neste contexto, o Brasil ganha forte destaque, sendo o segundo maior produtor mundial de biocombustíveis, ficando atrás apenas do Estados Unidos da América (Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP, 2022) e o oitavo maior produtor mundial de petróleo (EIA, 2023). Para o Brasil, entretanto, BINENBOJM (2005) alerta que o avanço das agências reguladoras no Brasil, marcado pelo cenário de privatizações e desinvestimentos e grande intervenção regulatória, pode desencadear frustrações ou desestímulos, afastando o investidor, apesar de trazer uma questionável estabilidade regulatória.

Olhando para o Brasil, o arcabouço legal e regulatório nacional ainda é bem incipiente, sem nenhuma legislação e/ou regulação específica. A ausência de instrumentos legais, regulatórios e institucionais balizadores pode ser um entrave no desenvolvimento de políticas públicas que incentivem projetos de CCS, uma vez que a insegurança jurídico-regulatória impactará negativamente na atratividade para o investidor, dificultando a atração de interessados no desenvolvimento de projetos sem que as regras estejam postas na mesa.

Nesta linha, CUNHA e SECCHI (2021) defendem que a regulação é uma forma do estado gerir setores de impacto para a sociedade. O regulador tem papel de aproximar os interesses provados do público/social, possuindo papel importante na construção e execução de políticas públicas.

No âmbito do CCS, a IEA (2023), elenca ações prioritárias que deverão ser observadas na construção do arcabouço legal e regulatório, sendo elas: (i) estabelecer a base de atuação; (ii) definir o escopo regulatório; (iii) definir salvaguardas ambientais e buscar engajamento público; (iv) viabilizar primeiros projetos (first-mover); (v) garantir segurança; (vi) endereçar responsabilidades de longo prazo; (vii) avaliar questões aduaneiras e transfronteiriças; (viii) fomentar hubs de CCS; (ix) gerenciar outros problemas que surjam ao longo do desenvolvimento do CCS.

Como já destacado, este trabalho não ousará apresentar uma sugestão de proposta regulatória sobre o tema, porém, esta contextualização faz-se necessária uma vez que a ausência de uma regulação formal poderá gerar resultados negativos em qualquer proposta de política pública que se faça presente.

2.3 CONTRIBUIÇÃO NACIONALMENTE DETERMINADA E OS DESAFIOS PARA A DESCARBONIZAÇÃO

A preocupação global com as mudanças climáticas levou à adoção de instrumentos inovadores para enfrentar os desafios impostos pelo aquecimento global. Uma abordagem crucial nesse contexto foi a criação das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC's), que emergiram como um componente fundamental do Acordo de Paris (UNFCCC, 2015). As NDC's são compromissos voluntários assumidos pelos países para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e promover a adaptação às mudanças climáticas.

O conceito de NDC's tem suas raízes na necessidade de envolver todos os países, independentemente de seu nível de desenvolvimento, nas ações climáticas. A ideia central foi permitir que cada nação estabelecesse metas de redução de emissões alinhadas com suas circunstâncias específicas, capacidades e responsabilidades históricas. Esse enfoque flexível visou incentivar a participação global e promover uma resposta climática mais justa e equitativa. Contudo, para uma melhor contextualização, é preciso voltar no tempo.

Em 1992, foi realizada no Rio de Janeiro, pela Organização das Nações Unidas - ONU, a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (Rio 92), onde 179 países consolidaram uma agenda global para minimizar os problemas ambientais mundiais (BRASIL, 2023). Deste evento, surgiu a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC), definindo compromissos e obrigações para todos os países participantes.

Um dos desdobramentos da Rio 92 foi o Protocolo de Kyoto, tratado na Conferência das Partes 03 (COP-03), em 1997, que foi um primeiro passo dos países desenvolvidos para a redução das emissões de carbono. Um de seus compromissos estabelecia a redução, em média, de 5% das emissões de carbono para 37 países industrializados e economias em transição (UNFCCC, 1998). O Brasil, aderiu, voluntariamente o Protocolo de Kyoto em 2002 (BRASIL 2023). Todavia, o Protocolo de Kyoto não obteve avanços significativos, uma vez que possuía metas flexíveis e não atribuiu compromissos compulsórios às nações em franco desenvolvimento.

Como uma forma de se avançar nas discussões climáticas e na direção de uma coalizão global, , foi realizada a COP-21, em Paris, que teve como principal desdobramento o Acordo de Paris. Como principal obrigação deste acordo, as partes se comprometeram a perseguir e adotar medidas para limitar o aquecimento global, até o ano de 2030, a 1,5°C acima da temperatura média global antes da fase pré-industrial. O Brasil assumiu compromissos, na forma de Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), de reduzir, até 2030, as emissões de carbono em 53%, comparado com o ano de 2005.

O atingimento à meta é complexo e exigirá esforços conjuntos das principais economias mundiais. As matrizes energéticas das principais economias globais são distintas, assim como os níveis de acesso e desenvolvimento tecnológico, que poderão conduzir a caminhos distintos daqueles definidos pelas NDC's. Neste sentido, GEELS (2012) versa que a maioria dos países não trabalha ativamente em direção a esta transição, uma vez que a mudança climática não está no topo de suas preocupações, mas sim a estabilidade no suprimento e a garantia da soberania energética das nações.

Dentro deste contexto, o Brasil possui características peculiares que o difere de outras nações, colocando-o em posição de vantagem. Segundo dados recentes da Empresa de Planejamento Energético (EPE, 2022), quase 45% da oferta interna de energia é composta por fontes renováveis, colocando-o na primeira posição em escala global no que tange a este quesito. Além disso, o Brasil é o segundo maior produtor mundial de biocombustíveis, ficando atrás apenas do Estados Unidos da América (IBP, 2022). Outro aspecto importante é o que país é o oitavo maior produtor mundial de petróleo (EIA, 2023). Tais fatores deverão ser levados em consideração na definição das políticas públicas para a redução de emissões. Entretanto, como aproveitar este potencial energético e, ainda, atingir as NDC's?

A CCS vem sendo apontada como uma das soluções para equalizar, no curto prazo, a necessidade por se reduzir as emissões de carbono junto à crescente demanda energética e ao fato de muitas tecnologias energéticas substitutas ainda não serem acessíveis ou possuírem alto custo de desenvolvimento e implantação. BUI, *et al.* (2018) reconhecem que o CCS desenvolverá papel importante para a mitigação do aquecimento global. Mas o que seria o CCS?

Segundo IEA (2020)¹², CCS se refere a:

Um conjunto de tecnologias que envolve a captura de CO₂ a partir de grandes fontes pontuais, incluindo usinas de geração de energia ou instalações industriais que utilizam tanto combustíveis fósseis quanto biomassa como combustível. O CO₂ também pode ser capturado diretamente da atmosfera. Se não for utilizado no local, o CO₂ capturado é comprimido e transportado por meio de oleodutos, navios, trens ou caminhões para ser usado em uma variedade de aplicações, ou injetado em formações geológicas profundas (incluindo reservatórios de petróleo e gás esgotados ou

¹² Traduzido do inglês: refers to a suite of technologies that involves the capture of CO₂ from large point sources, including power generation or industrial facilities that use either fossil fuels or biomass for fuel. The CO₂ can also be captured directly from the atmosphere. If not being used on-site, the captured CO₂ is compressed and transported by pipeline, ship, rail or truck to be used in a range of applications or injected into deep geological formations (including depleted oil and gas reservoirs or saline formations) which trap the CO₂ for permanent storage. The extent to which CO₂ emissions are reduced in net terms depends on how much of the CO₂ is captured from the point source and whether and how the CO₂ is used. (IEA. 2020, p. 19)

formações salinas) que retêm o CO₂ para armazenamento permanente. O grau de redução das emissões de CO₂ em termos líquidos depende de quanto CO₂ é capturado na fonte pontual e se e como o CO₂ é utilizado.

Apesar de não ser uma solução nova (HASAN, *et al.* 2022; NAGABBHUSHAN, *et al.* 2021; IEA, 2020), o estabelecimento de políticas públicas para o desenvolvimento de projetos de CCS no mundo e a percepção pública deste tipo de alternativa para mitigar as emissões de carbono vem oscilando nas últimas décadas (SCHIPERS, 2022). Sua associação, majoritariamente, à exploração de petróleo, o desconhecimento público acerca da tecnologia e o anseio popular para uma rápida transição energética para matrizes renováveis e de baixa emissão de carbono dificultam a implementação em larga escala de projetos de CCS no mundo (HOLZ, *et al.* 2021; VÖGELE, *et al.* 2018).

Contribuindo com essa visão, MAKITIE, *et al.* (2019), de forma pragmática, destacam que o principal objetivo das empresas é gerar lucro. Desta forma, enquanto a exploração de combustíveis fósseis se mostrar lucrativa, dificilmente haverá uma transição para uma economia de baixo carbono, o que justificaria o receio em relação à CCS. Na mesma linha, HELM (2021) questiona a retórica construída por EUA e Reino Unido que, por um lado, alegam estarem preocupados com o meio ambiente, mas, por outro, continuam incentivando o consumo de derivados de petróleo e mantendo fontes como o carvão em sua matriz energética, construindo “alternativas” para que não haja um compromisso firme de descarbonização.

Contudo, para NAGABHUSHAN, *et al.* (2021), a adoção da CCS recebe contornos importantes, uma vez que resolve, mesmo que parcialmente, alguns problemas intrínsecos da transição energética, como a ruptura de sistemas sociotécnicos e a necessidade atual e crescente por mais energia, além de fazer parte de um conjunto de estratégias que será essencial para controlar o custo de uma transição global para uma economia de carbono zero, onde a CCS exercerá papel importante na mitigação das mudanças climáticas. Na mesma esteira, HOLZ, *et al.* (2021) reforçam que a CCS pode contribuir com a descarbonização, mas que ausência de regulação específica e arcabouços legais insuficientes prejudicam o desenvolvimento de projetos deste tipo ao redor do mundo.

Para o Brasil, a implementação de projetos de CCS pode contribuir com o cumprimento das NDC's e, ao mesmo tempo, manter a posição favorável do país no que tange à soberania e independência energética.

2.4 ASPECTOS TECNOLÓGICOS DO CCS NO BRASIL

Um aspecto que é observado por uma firma para considerar um possível ingresso em determinada atividade é sua capacitação tecnológica. E o mesmo racional pode ser considerado na busca pela inovação. Segundo TIDD e BESSANT (2009), o sucesso na inovação depende de dois fatores: recursos técnicos e a capacidade da firma em geri-los. Nesta mesma linha, SCHILING (2006) observa que as mais significantes fontes de inovação surgem da colaboração entre empresas e/ou indivíduos, dividindo recursos e aproveitando capacidades.

Quando se discute projetos de pesquisa e desenvolvimento para o CCS, a capacitação tecnológica é um fator crítico. Resumidamente, o CCS é um processo que consiste em: (i) retirada de CO₂ gerados pela indústria, oriundos da geração de energia ou capturados diretamente da atmosfera; (ii) transporte para um local de armazenamento; e (iii) armazenamento e isolamento permanentemente de uma maneira que o impeça de ser devolvido à atmosfera (GARBA e GALADIMA, 2018). Parece simples, mas como construir tais reservatórios? E mais: onde construí-los?

Em razão da complexidade em implementar instalações de armazenagem, o CCS tem sido muito associado à indústria de óleo e gás, uma vez que os reservatórios de petróleo e gás natural são formações geológicas perfeitas, naturalmente testadas, para este fim e a tecnologia amplamente conhecida no setor, corroborando com a visão de MALERBA (2002), de que as firmas e indústrias já consolidadas poderão ter mais êxito em situações em que há a necessidade de uma maior capacidade tecnológica.

Neste sentido, RÓMAN e SCHOTT (2011), destacam que o conhecimento adquirido pela Petrobras nas operações de EOR colocam o Brasil na posição de líder mundial nesta tecnologia. O mesmo posicionamento é compartilhado em BECK *et al.* (2011), que destacam a experiência no Brasil no desenvolvimento e implementação de tecnologias para o EOR.

A literatura indica que há a capacitação técnica dentro do Brasil para o desenvolvimento de projetos de CCS. Entretanto, esta capacitação está concentrada no setor de exploração e produção de petróleo, estando diretamente relacionada a EOR. Desta forma, um desafio seria disseminar ou, ao menos, utilizar este conhecimento para outras áreas não relacionadas diretamente à atividade petrolífera.

O que motivaria uma empresa a utilizar uma tecnologia que já domina em outra frente de negócio, que não está relacionada com o seu core business, ou, minimamente, desenvolver parcerias para utilizar esta capacidade em conjunto com outras empresas?

Um grande desafio para estimular projetos de pesquisa e desenvolvimento em outros segmentos são as diferentes dinâmicas setoriais e a concentração da capacitação técnica no setor de óleo e gás. O CCS poderia ser pensado como um único setor, o que facilitaria a constituição de um sistema setorial de inovação. Segundo MALERBA (2002), um sistema setorial de inovação seria um conjunto de produtos (novos ou já estabelecidos) para uma finalidade específica e um conjunto de agentes que seriam responsáveis pelas interações que possibilitaria a criação, produção e comercialização destes produtos.

Contudo, nem tudo são flores. Segundo HASAN *et al.* (2012), a armazenagem de CO₂ pode ocorrer em formações geológicas de rochas sedimentares, reservatórios salinos e reservatórios de petróleo e gás natural depletados. Desta leitura, temos três setores distintos que poderiam concorrer a projetos de CCS: (i) o já citado setor de óleo e gás; (ii) mineração; e (iii) águas e recursos hídricos.

As especificidades regulatórias e exploratórias destes setores, somadas à concentração da capacitação técnica no primeiro, dificultam a criação de um sistema setorial de inovação. A construção de um sistema setorial deveria considerar as diferentes dinâmicas de cada um destes três setores, bem como a fusão e integração de conhecimento e tecnologia e a construção de novas relações entre estes setores (MALERBA, 2002). Alternativamente, adaptando a teoria de SCHILING (2006), a criação de uma rede setorial de CCS entre as diversas empresas e agentes envolvidos poderia ser uma forma de estreitar fronteiras e permitir a criação de um sistema setorial de inovação.

Todavia, a concentração de esforços na construção de uma rede setorial de CCS não parece fazer sentido. Como já apontado, o CCS deve ser tratado em conjunto com a busca por fontes de energia menos poluidoras e por processos industriais mais eficientes. Direcionar esforços para expandir a capacitação técnica entre os diversos setores poderá impactar no desenvolvimento dos outros dois aspectos (energia e processos mais limpos), prejudicando o atingimento das NDC's.

3 PROGRAMAS DE CCS EM DESENVOLVIMENTO NO BRASIL: UMA COMPARAÇÃO COM OS CASOS DOS EUA E NORUEGA

A necessidade de redução das emissões globais de carbono encontra um contraponto na crescente demanda mundial por energia e no alto custo de desenvolvimento e implantação de novas tecnologias. Como já mencionado, organismos como a IEA (2020; 2021; 2023) e a IRENA (2021) vêm apontando desafios para o cumprimento das metas de descarbonização e o pleno atingimento das NDC's em escala mundial.

Segundo SHU *et al.* (2023), a redução das emissões e a busca pelo *net-zero* deve ocorrer de forma rápida, para que não haja maiores danos ao ambiente e a vida. Entretanto, a IEA, em seu relatório *Energy Technology Perspectives* (IEA, 2023) apresentou elementos de preocupação para a transição energética decorrentes da concentração na cadeia de suprimentos tecnológica necessária para uma transição baseada em energia eólica, solar ou por eletrólise de hidrogênio. Em uma análise crítica, a agência apresentou uma preocupação mundial, confirmando que o custo de energia continuará sendo um diferencial competitivo entre países e que pode ser um fator prejudicial à descarbonização.

Neste cenário, a CCS desponta como uma solução para contribuir com a transição energética, permitindo a manutenção da exploração de fontes fósseis com a captura e armazenamento do CO₂, seja através da captura diretamente das fontes poluidoras, seja através da captura atmosférica. Todavia, cabe destacar que esta não é uma solução recente e já vem sendo explorada desde a segunda metade do século passado.

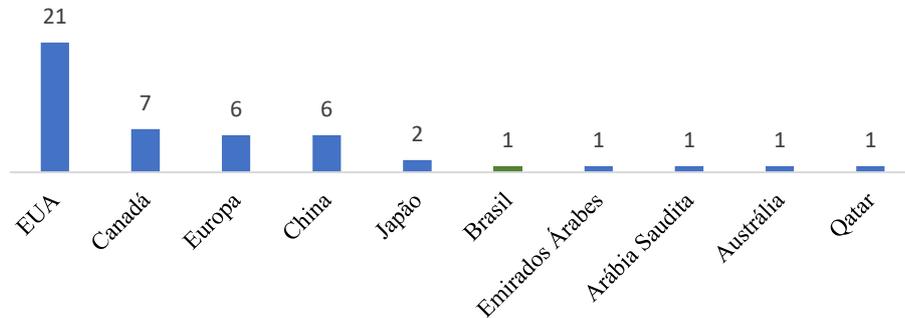
O CCS já era utilizado desde a década de 1972 (IEA, 2020) na EOR, ratificando que é uma solução de engenharia já considerada há pelo menos 50 anos na indústria de óleo e gás. Inicialmente, esta operação tinha por objetivo otimizar a produção dos campos de petróleo, através da injeção de CO₂, forçando a saída do óleo cru. Contudo, foi percebido o seu potencial na redução de emissões e a CCS passou a ser considerado como uma alternativa consistente na busca pela redução de emissões. A primeira utilização em larga escala do CCS para fins de remoção de carbono ocorreu em 1996, na Noruega, no Campo de Sleipner (IEA, 2020). Desde então, novos projetos surgiram no âmbito mundial.

Segundo dados da CCS BRASIL (2023), existem, atualmente, 47 projetos relacionados com o CCS em operação no mundo¹³, sendo que aproximadamente 45% destes projetos estão localizados nos Estados Unidos, conforme Gráfico 1. Além disso, foram

¹³ Projetos de cadeia completa, só captura, só armazenamento, só transportes ou de utilização, larga ou pequena escala (CCS BRASIL, 2023, p. 10)

anunciados 159 novos projetos de CCS a serem implementados no mundo. No Brasil, há apenas uma iniciativa concreta em operação (CCS BRASIL, 2023; IEA, 2020), mas um potencial de captura de até 32% das emissões do setor de energia, ou 130 M tCO₂ (CCS BRASIL, 2023).

Gráfico 1 – Quantidade de projetos de CCS em operação



Fonte: Elaborado pelo autor com dados de CCS BRASIL (2023).

Conforme leciona BUI, *et al.* (2018), um dos principais desafios para a implementação de novos projetos de CCS é que os modelos adotados até o momento preveem que o setor privado tenha que gerenciar todos os riscos da cadeia e ao longo de toda o período de armazenamento. Apesar das empresas e agentes privados terem condições de gerenciar e precificar riscos de forma competitiva, a dificuldade de prever comportamentos estatais de longo prazo dificultam a criação de modelos comerciais específicos para o CCS (ARAÚJO, *et al.* 2021), uma vez que as incertezas inerentes à CCS no longo prazo inviabilizam o atingimento de uma taxa de retorno de investimento atrativa. Desta forma, a aplicabilidade da CCS fica, muitas vezes, direcionada aos projetos de CCS com finalidade de EOR, uma vez que já é um modelo de viabilidade comprovada e faz parte da estratégia de exploração de campos produtivos de petróleo.

Ratificando este entendimento, dados da IEA (2020) indicam que apenas 5 dos 21 principais projetos de CCS¹⁴ em operação no mundo são dedicados para a armazenagem e captura de carbono. Por outro lado, 75% dos projetos ainda possuem a finalidade de atender a recuperação avançada de petróleo. Ainda segundo BUI, *et al.* (2018) há uma falta de modelos comerciais com viabilidade técnico-econômica comprovada para a implementação de CCS, diferente da indústria de EOR. A falta de novos modelos e de iniciativas de políticas públicas pode ser um dificultador no desenvolvimento de projetos de CCS.

¹⁴ Considera apenas os projetos de larga escala (IEA, 2020, p. 22)

Conforme dados da CCS BRASIL (2023), apesar do potencial de captura de CO₂ e do alinhamento que as iniciativas de CCS possuem com o planejamento energético nacional e o potencial exploratório de reservas de petróleo, em 2023 havia somente um projeto implementado no Brasil, na bacia de Santos para EOR e apenas dois novos projetos anunciados para o país. A FS Bioenergia anunciou, em junho de 2021, a expectativa de investir R\$ 250 milhões em um projeto de Bioenergia e CCS (BECCS) em uma usina de etanol no estado do Mato Grosso¹⁵, com potencial de captura de 420 M tCO₂/ano. Já as empresas SATC, ENEVA e UFC anunciaram projeto piloto de pesquisa e desenvolvimento para captura de CO₂ a partir da geração de energia termoelétrica a carvão. Além destes projetos destacados pela CCS BRASIL (2023), a Petrobras anunciou recentemente o início de mais um projeto para o desenvolvimento do CCS no Norte Fluminense¹⁶ e o desenvolvimento do projeto HIZEP¹⁷. De toda a forma, ainda são iniciativas tímidas para um cenário em que as reduções de emissões de gases geradores do efeito estufa são essenciais para o atingimento das metas de NDC.

Resta claro que há poucos projetos de CCS em desenvolvimento no Brasil. Relembrando os aspectos abordados no capítulo anterior, a construção de políticas públicas tem papel fundamental na mudança de paradigmas consolidados. Uma vez identificado um problema de interesse público (neste caso, a necessidade de redução e controle das emissões de gases do efeito estufa), é necessário que o poder público construa pontes para que este problema ser solucionado.

Há uma necessidade de transformação da sociedade, que envolve a desconstrução de regimes sociotécnicos consolidados e a ascensão de novos regimes. Contudo, para que esta transformação ocorra, é mister que se construa um ambiente favorável e atrativo para novos investimentos, tanto no âmbito político quanto nas esferas regulatórias e de inovação.

Assim, como já mencionado, em que pese o compromisso de redução de emissões assumido formalmente através das NDC's e a inequívoca capacitação técnica, ainda que limitada a um único setor da indústria nacional, a inexistência de políticas públicas e de um arcabouço regulatório tende a ser um detrator para o desenvolvimento de projetos de CCS no país. Recapitulando, o CCS se apresenta como uma solução potencial para suportar o cumprimento das NDC's, sem que ameace a segurança energética nacional.

¹⁵ Disponível em: <https://www.terra.com.br/economia/fs-bioenergia-vai-investir-r-250-milhoes-para-ter-1-usina-do-brasil-com-pegada-de-carbono-negativa,26871fdc06a5ddc8d0cabfa9b6d481cd2wxzyspk.html>. Acesso em 23/05/2023

¹⁶ Disponível em: <https://petrobras.com.br/fatos-e-dados/otc-2023-estudamos-projeto-inedito-de-hub-de-captura-e-armazenamento-geologico-de-co2-no-brasil.htm>. Acesso em 20/10/2023

¹⁷ Disponível em: <https://sigitec-competitividade.petrobras.com.br/v2/public/opportunity/public-selection/1361>. Acesso em 09/01/2023

Nas seções seguintes, serão introduzidos alguns dos motivadores que levaram ao desenvolvimento do projeto de CCS da Petrobras na Bacia de Santos e as perspectivas para o desenvolvimento de projetos de CCS no país, a implementação do projeto piloto de Sleipner, na Noruega e a política de incentivos para projetos de CCS nos EUA. Considerando os aportes conceituais até então debatidos, estes motivadores buscaram testar três hipóteses:

(i) a ausência de uma política de taxaço do carbono inibe investimentos no setor, uma vez que não há nenhum atrativo (ou garantia) para que as empresas aportem um capital intensivo em investimentos sem um retorno mensurável. Assim, o estabelecimento de tarifas para o carbono, a criação de um mercado de carbono estruturado ou a concessão de incentivos fiscais poderiam ser motivadores para que as empresas privadas investissem com maior apetite neste seguimento.

(ii) a falta de um arcabouço legal e regulatório, estabelecendo as premissas básicas para esta atividade, gera insegurança jurídico-regulatória, afasta investidores.

(iii) a dotação institucional dos países contribui para a maior efetividade dos projetos de CCS.

3.1 PETROBRAS E CCS NA BACIA DE SANTOS E NO NORTE FLUMINENSE

Atualmente, a única iniciativa para CCS em operação no Brasil é o EOR na Bacia de Santos (CCS BRASIL, 2023; IEA, 2020). Entretanto, é importante lembrar que antes desta iniciativa, foi desenvolvido, na década de 1990, o projeto para CCS na Bacia do Recôncavo, conforme rememorado por HATIMONDI, *et al.* (2011), SILVA, *et al.* (2022) e NETTO, *et al.* (2020). Assim, a captura e armazenagem de CO₂ para fins de EOR na Bacia do Recôncavo, pode ser considerado, o primeiro projeto de CCS da PETROBRAS e do Brasil.

Entre os anos de 1991 e 2005 houve a injeção de 600 k TCO₂, permitindo a recuperação de 1m³ de petróleo para cada 2,58 k TCO₂ (SILVA, *et al.* 2022). Este estudo possibilitou avaliar a formação rochosa, mecanismos de interação entre os gases e a rocha, tecnologias aplicáveis, selagem do reservatório e os impactos do CO₂ na integridade e na cementação. Segundo DINO e GALLO (2009), este projeto contribuiu para desenvolver e avaliar a tecnologia necessária para a captura e o armazenamento de carbono em formações rochosas. Quanto à percepção pública, NETTO, *et al.* (2020) sinalizam que a característica da comunidade local (baixo nível de escolaridade e baixo entendimento sobre as mudanças climáticas), somada a grande preocupação com os riscos desta armazenagem e a ausência de retornos tangíveis para aquela comunidade, como, por exemplo, novos empregos, fizeram com

que eventuais prejuízos sobrepassassem os potenciais benefícios, indicando que a falta de informação e os aspectos sociais podem impactar negativamente projetos deste tipo.

Já o projeto de CCS na Bacia de Santos se iniciou após a descoberta do Campo de Tupi (antigo Campo de Lula). Segundo SILVA, *et al.* (2022), o alto grau de CO₂ misturado ao petróleo permitiu um alinhamento entre a estratégia econômica de exploração e as ambições ambientais da Petrobras. A localização do campo, a 230 km da costa e 2.200 metros de profundidade elevavam os custos para tratamento deste petróleo. Além do que, o lançamento do CO₂ após a separação da fase líquida da fase gasosa poderia causar danos ambientais e significar em penalidades e autuações para a empresa. Desta forma, a solução encontrada e adotada foi utilizar separar o CO₂ do petróleo cru em instalações offshore e injetá-los diretamente no poço. Assim, três benefícios foram percebidos: (i) redução dos custos logísticos; (ii) controle da emissão de CO₂ na atmosfera; e (iii) aumento da produção do campo com a injeção direta de CO₂ (EIDE, *et al.*, 2019).

Para RÓMAN e SCHOTT (2011), o desenvolvimento dos projetos de CCS da Petrobras possuiu viés operacional, ou seja, visava à maior produtividade dos poços de petróleo, não sendo, efetivamente, projetos com foco na redução de emissões. Esta mesma interpretação é dada por BECK, *et al.* (2011), que, assim como EIDE, *et al.* (2019) analisam como essencial para a viabilidade de alguns campos a injeção de CO₂, incentivando a EOR.

Entretanto, a Petrobras divulgou recentemente a criação de um hub focado no CCS a ser instalado no Norte Fluminense. Segundo informações no site da própria empresa, “o projeto piloto vai contribuir não apenas para testar tecnicamente as soluções de CCS, mas também para ajudar o país a construir um arcabouço regulatório que fomente este tipo de projeto”.

Desta forma, deduz-se que a ausência de um arcabouço regulatório é um potencial inibidor para novos projetos, vinculando os poucos projetos que efetivamente saíram do papel a uma empresa de controle estatal e podendo afastar o surgimento de novos entrantes.

Outro aspecto relevante é a ausência de incentivos econômicos para o desenvolvimento de projetos de CCS no país. Não há mecanismos claros no país que fomentem projetos relacionados à redução de emissões. Para que tais projetos sejam atrativos, no contexto atual, deverão estar intrinsecamente relacionados com uma atividade lucrativa, como, por exemplo, a produção de petróleo, ou serem diretamente liderados por autoridades públicas, não visando à lucratividade, mas um retorno socioambiental.

3.2 PERSPECTIVAS PARA O DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS DE CCS NO BRASIL

O desenvolvimento de projetos de CCS no país encontrará 3 principais desafios: (i) custos para construção e desenvolvimento de infraestruturas; (ii) definição de questões jurídico-regulatórias; e (iii) estabelecimento de políticas públicas de incentivo para o desenvolvimento do CCS (MACHADO E SILVA, 2022).

A implementação de projetos de CCS no Brasil está muito relacionada a recuperação avançada de petróleo (EOR), que é um processo em que o CO₂ é reinjetado nos poços de produção de petróleo, permitindo um maior fator de produção do poço. O custo para a construção e desenvolvimento de infraestruturas é um fator crítico para o estabelecimento de novos projetos de CCS e, mais ainda, para desvincular o CCS apenas do EOR. Obviamente, o EOR é uma alternativa já conhecida e adotada há décadas na indústria de óleo e gás e, conseqüentemente, a solução amplamente implementada quando se discute projetos de CCS. Contudo, há duas perspectivas que devem ser consideradas: (i) como incentivar uma economia de baixo carbono se uma das soluções para neutralizar as emissões de carbono na atmosfera poderia, justamente, motivar a utilização de combustíveis fósseis (CCS para fins de EOR); e (ii) como trazer o CCS para perto das fontes poluidoras, visto que as principais reservas de petróleo do país se encontram localizadas *offshore* (ANP, 2023).

Quanto à primeira perspectiva, MABON e LITTLECOTT (2016), ao avaliarem a percepção da sociedade do Reino Unido em relação aos projetos de CCS voltados para o EOR, identificaram que tomadas de decisões de curto prazo (vinculada em particular aos ciclos eleitorais) e a ausência de planejamento de longo prazo para a implantação de infraestrutura e de um plano de transição energética comprometem a percepção positiva da sociedade para este tipo de medida.

Na mesma esteira, ZAKKOUR, *et al.* (2014), esclarecem que o financiamento de projetos de EOR através de recursos para a redução dos efeitos das mudanças climáticas podem ser contraditórios, uma vez que poderia incentivar, no curto prazo, o aumento da produção de petróleo e seus derivados, mesmo os autores reconhecendo que, no contexto atual, o CCS é essencial para o atingimento das metas de redução de emissões. MARTÍNEZ (2016) e WAXMAN, *et al.* (2021) seguem a mesma linha, defendendo o papel essencial do CCS na mitigação da mudança climática, propondo a adoção de algumas medidas para limitar o CCS, como, por exemplo, limitação das políticas de financiamento para este fim, precificação do carbono e demonstração pública dos projetos de CCS.

Em relação à segunda perspectiva, o Brasil ainda está bem incipiente. Como já mencionado, não há nenhuma legislação e/ou regulação específica sobre o tema. Sem a existência de diretrizes básicas sobre o assunto, há uma situação de insegurança jurídica e a indefinição de políticas públicas sobre o tema. Segundo BROECKS, *et al.* (2016), a ausência de normas e regras dificulta o engajamento dos setores da sociedade sobre o tema, podendo levar a um aumento da percepção de risco e incertezas. Segundo MACHADO E SILVA (2022), a ausência de um desenho jurídico-regulatório específico sobre o CCS pode aumentar a percepção de insegurança, levando o investidor a aumentar sua precificação pelo risco, onerando os projetos e impactando, inclusive, na viabilidade financeira.

Assim, resta claro que estes dois aspectos estão intrinsecamente conectados com um terceiro: estabelecimento de políticas públicas de incentivo para o desenvolvimento do CCS. FREEMAN e YELLEN (2018) relembram que o CCS enfrenta muita oposição de negacionistas do aquecimento global, que o veem o CCS como um desperdício de dinheiro, e de defensores do clima ortodoxos, que temem que o CCS seja usado para justificar a dependência contínua de combustíveis fósseis. MABON e LITTLECOTT (2016), ao estudarem o EOR no Mar do Norte, identificaram que os formuladores de políticas devem construir cenários que posicionem o CCS no pensamento integrado de longo prazo, transpondo os ciclos políticos de curto prazo, de forma a obterem apoio do público e das partes interessadas.

Diante deste contexto, cabe recordar neste ponto a questão central apresentada acima: quais seriam os desafios a serem superados, em matéria de capacitação tecnológica e dotação institucional/regulatória, para implementar uma política pública com foco no desenvolvimento do CCS no Brasil? A construção de um arcabouço regulatório, a capacitação e o desenvolvimento tecnológico e as diversas dinâmicas setoriais envolvidas devem ser pensadas para incentivar e viabilizar o desenvolvimento de projetos de CCS. As políticas públicas devem ser elaboradas de modo a contribuir com uma economia de baixo carbono, levando em consideração aspectos econômicos, tecnológicos, ambientais e sociais. Segundo DESMOITIER, *et al.* (2023, p.1)¹⁸:

A formulação de políticas tem um papel fundamental a desempenhar na concepção de políticas transformacionais que permitem uma mudança disruptiva de práticas

¹⁸ Tradução livre para: “policymaking has a key-role to play in designing transformational policies that enable a disruptive shift from unsustainable practices to zero carbon and sustainable societies in line with the objectives of the Paris Agreement and the United Nation's global Sustainable Development Goals (SDGs). Furthermore, transformational policies need to address the interdependence of environmental, economic and social issues. It is important to develop policy- and decision-support methods and tools that cover all three sustainability dimensions to promote synergies and avoid simply shifting the burden from one dimension to another.”

insustentáveis para carbono zero e sociedades sustentáveis, de acordo com os objetivos do Acordo de Paris e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável globais das Nações Unidas. As políticas transformacionais precisam abordar a interdependência das questões ambientais, econômicas e sociais. É importante desenvolver métodos e ferramentas de apoio a políticas e decisões que cubram todas as três dimensões da sustentabilidade para promover sinergias e evitar simplesmente transferir o ônus de uma dimensão para outra.

CABRAL, *et al.* (2019) alertam que a implementação de projetos de CCS podem demandar transformações nos processos industriais, uma vez que, à exceção do setor energético, a heterogeneidade das indústrias poderia dificultar a adoção de soluções de CCS em larga escala, fazendo com que o abatimento de emissões de carbono possa ser uma solução. Contudo, esta solução só será possível com a implementação de mercados regulados de carbono e estruturação de um arcabouço regulatório robusto que defina as regras do jogo. Dentro do aspecto social, é importante destacar que o CCS também pode criar empregos e lucros a partir do que antes era apenas um material residual, criando uma economia maior em torno do carbono (FREEMAN e YELLEN, 2018).

Outro aspecto relevante para o desenvolvimento de projetos de CCS é a adoção de políticas que incentivem financeiramente a implementação de um programa para este fim. Mecanismos como, por exemplo, a taxaço do carbono, incentivos fiscais ou *cap-and-trade* têm a capacidade de fomentar iniciativas voltadas para o CCS. A ausência de dispositivos econômicos que estimulem novas instalações poderá limitar o CCS a situações em que a EOR seja comprovadamente rentável ou quando houver um interesse institucional na implementação de um projeto de CCS.

Conforme observado por RIMMER (2021), a captura e o armazenamento de carbono serão sempre uma questão de custo de oportunidade. Em outras palavras, para que haja o desenvolvimento de projetos com este fim, será necessária a construção de políticas públicas que tragam incentivos financeiros. Reforçando esta posição, cumpre lembrar FREEMAN e PEREZ (1988), que destacaram que a mudança de paradigmas depende fortemente da construção de políticas públicas que criam um ambiente favorável para a mudança necessária em busca da transição energética. O desenvolvimento de um novo modelo tecno-social dependerá do estabelecimento de bases estruturantes que viabilizem a alocação de capital em novas soluções e permitam o início da quebra de um modelo consolidado.

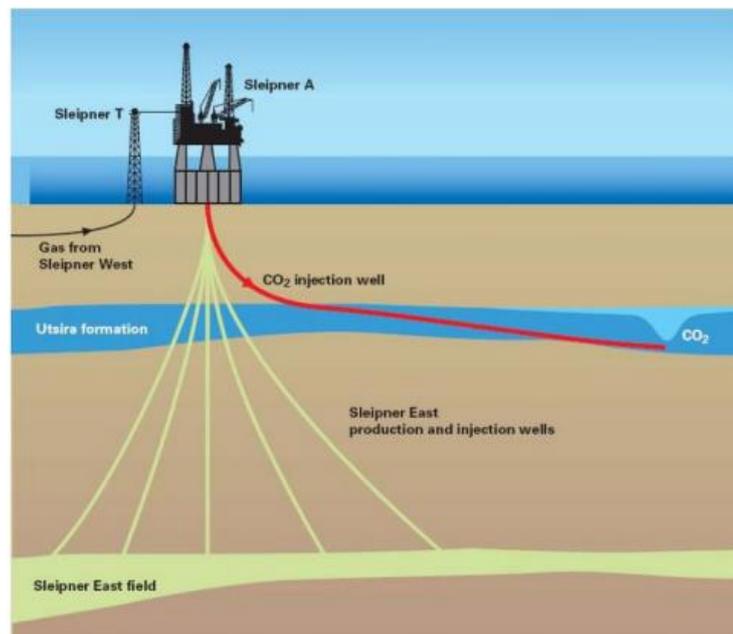
Destarte, o desenvolvimento de projetos de CCS no país dependerá da adoção de políticas públicas de longo prazo, que transpasse os ciclos políticos eleitorais, permitindo

transparência, estabilidade e continuidade. Deverão concatenar aspectos ambientais, econômicos e sociais, objetivando o cumprimento das NDC's, mas permitindo a viabilidade técnico-econômica.

3.3 NORUEGA E SLEIPNER: O PRIMEIRO PROJETO MUNDIAL EM GRANDE ESCALA

O campo de Sleipner, na Noruega, foi o primeiro grande projeto dedicado para o CCS no mundo. Comissionado em 1996, utilizou um reservatório salino para aprisionar o CO₂ industrial produzido na Noruega, se tornando um grande hub de CCS. Sleipner foi uma solução para destinar o CO₂ proveniente do campo de gás natural de mesmo nome. Como observado na Figura 1, o projeto Sleipner consistia na extração do gás natural proveniente dos campos Sleipner Leste e Oeste, separação do CO₂ do gás natural e injeção do CO₂ remanescente no reservatório salino de Utsira.

Figura 1: Projeto de armazenagem de CO₂ de Sleipner, Noruega



Fonte: SENGUL, 2006, apud KALAM, et al. 2020

Conforme já apontado por BRUNDTLAND¹⁹ (1988) e STERN²⁰ (1990), o campo de gás natural de Sleipner era a “menina dos olhos” do governo norueguês. Este interesse derivou das grandes reservas de gás natural encontradas à época, sendo uma fonte rica para abastecimento das usinas térmicas a gás, uma das principais fontes de energia do país (TORVANGER e MEADOWCROFT, 2011; RÓMAN e SCHOTT, 2011; BRUNDTLAND, 1988).

Porém, havia dois problemas: (i) o gás natural de Sleipner era rico em CO₂ (aproximadamente 9%); e (ii) havia uma política nacional para reduzir o uso de usinas termelétricas alimentadas por combustíveis fósseis. Ainda, conforme lembra ARAÚJO, *et al.* (2021), durante a década de 1990, foi iniciada a política de taxaço de carbono no país, diminuindo a atratividade para a produção de gás natural, apesar do interesse e do alinhamento estratégico dentro da matriz energética norueguesa. Desta forma, um impasse foi criado.

Se, por um lado, havia o inequívoco interesse na exploração do gás natural, com consequente retorno econômico para as empresas de óleo e gás, mas com a expectativa de aumento da segurança energética, por outro lado, havia a pressão pública e política para a manutenção da política de redução de energia gerada por fontes fósseis e a taxaço do carbono.

3.3.1 Cenário político dentro do contexto da CCS

Nas últimas décadas, a Noruega exerceu papel protagonista nas discussões acerca das mudanças climáticas e do aquecimento global. Desde os anos 1980, o país tem se posicionado na vanguarda dos debates sobre o clima, apesar de enfrentar dificuldades internas, como sua matriz energética que depende parcialmente de fontes fósseis (TJERNSHAUGEN e LANGHELLE, 2009; RÓMAN e SCHOTT, 2011) e a significativa participação do setor de óleo e gás na economia do país (TJERNSHAUGEN e LANGHELLE, 2009; TORVANGER e MEADOWCROFT, 2011).

¹⁹ Este artigo, o da então primeira-ministra da Noruega Gro Harlem Brundtland (1988), apresenta seu ponto de vista quanto o cenário energético internacional, a preocupação com o meio ambiente e a importância do desenvolvimento de políticas públicas e cooperações internacionais para se preservar os recursos naturais, contrapondo com a importância do setor de óleo e gás para a economia norueguesa. Importante destacar que se trata de um posicionamento de quase 40 anos, em um momento cuja população mundial era na ordem de 5 bilhões de pessoas, aproximadamente 38% menor do que a população atual.

²⁰ O artigo de Jonathan Stern (1990) aborda um problema ainda atual: a existência de reservas de fontes energéticas fósseis comprovadamente viáveis e de significativo valor econômico, destacando o posicionamento de empresas em realizarem os ganhos com maior brevidade, tendo implicação direta na comercialização destas reservas e na busca por mercados consumidores imediatos, sendo um contraponto ao desenvolvimento de uma política energética com foco na descarbonização

De forma genérica, quatro direcionadores são comumente encontrados quando são verificados os motivadores para o suporte político nos projetos de CCS (LIPPONEN, *et al.* 2017): (i) reconhecimento de que o CCS é uma contribuição para redução das emissões no longo prazo; (ii) interesse na manutenção de matrizes fósseis; (iii) independência tecnológica; e (iv) economia local.

Quanto ao primeiro motivador, é importante que o governo entenda o CCS como um aliado na política climática. Não ter esta visão poderá impactar na busca por aliados, uma vez que a desassociação do CCS a uma política climática reduzirá a percepção de relevância para membros do governo de dificultará a construção de uma percepção positiva para a sociedade.

O segundo motivador retrata a necessidade de manutenção do *status quo* no que tange à geração de energia. Para países decididos a uma transição, a qualquer custo, para matrizes limpas, como, por exemplo, solar e eólica, ou países que possuem tal vocação e acesso tecnológico, o incentivo à projetos de CCS terá pouca chance de prosperar, uma vez que seu maior ganho está na captura do CO₂ direto de fontes poluentes. Utilizar o CCS para a captura direta da atmosfera implicará em custos adicionais, uma vez que a demanda energética é elevada, significando a necessidade de incremento da oferta de energia de forma proporcional (BISOTTI, *et al.* 2023).

A independência tecnológica também é fator relevante nesta discussão. Este terceiro motivador se justifica pelo fato de diferentes nações apostarem em diferentes caminhos. LIPPONEN, *et al.* (2017) ilustram, por exemplo, que a China possui ambição em ser o maior exportador de painéis fotovoltaicos do mundo. Japão, por sua vez, investe em tecnologias de captura, buscando ser a referência mundial. Neste contexto, a cadeia de suprimentos também passa a ser uma preocupação. O custo de energia continuará sendo um diferencial competitivo entre países. A dependência tecnológica ou de suprimentos de terceiros pode impactar diretamente a economia de uma nação.

Já o quarto motivador conversa diretamente com os outros três. É importante que o governo, ao decidir suportar uma política de CCS, verifique o alinhamento com a economia local. O CCS, em nações que possuem acesso à tecnologia, ou que são fortemente dependentes de combustíveis fósseis, pode ser uma alternativa para o atingimento dos objetivos climáticos. Por outro lado, forçar uma política de CCS sem que haja ganhos claros para a economia local pode ter o efeito reverso, gerando concorrência de esforços e dificultando a implementação de uma política climática e de transição energética eficiente.

Estes quatro motivadores podem ser observados no contexto norueguês. Segundo TJERNSHAUGEN e LANGHELLE (2009), quatro fatores importantes permearam os debates

acerca do CCS: (i) a ambição ambiental do país vis a vis a importância econômica do setor de óleo e gás; (ii) o desejo do setor energético em ampliar o uso do gás natural produzido na Noruega para geração de energia; (iii) o ambiente regulatório e político e o interesse de empresas do setor de óleo e gás em implementarem projetos de CCS; e (iv) a grande presença de ativistas ambientais no país. Estes quatro fatores evidenciaram problemas antagônicos: de um lado, o anseio em ser protagonista mundial nos debates e mudanças para uma economia de baixo carbono; por outro lado, uma demanda energética crescente, um setor forte e de impacto econômico.

Para conseguir administrar objetivos tão diversos, buscou-se o desenvolvimento de uma solução que harmonizasse os interesses antagônicos. Assim, o CCS surgiu como uma alternativa capaz de conciliar as necessidades energéticas, com o apetite do setor de óleo e gás. Segundo TORVANGER e MEADOWCROFT (2009), o fomento de projetos de CCS serviu como uma “cola política” ou, em outras palavras, foi a materialização de uma vontade política para solucionar um problema de interesse público, permitindo conciliar o desejo por uma economia menos intensiva de carbono com o aproveitamento de um recurso energético abundante e de significativa relevância para a economia norueguesa.

Outro fator importante decorrente deste protagonismo foi que a Noruega influenciou diretamente a construção da diretriz europeia para CCS, utilizando sua experiência de Sleipner como modelo para toda a União Europeia - UE (ARAÚJO, *et al.* 2021).

3.3.2 O sucesso de Sleipner

O sucesso de Sleipner deve-se, principalmente, a articulação política estabelecida pelo governo norueguês à época. No final da década de 1990, Thorbjørn Jagland, então primeiro-ministro do país, passou a cooptar aliados e apoiadores políticos, através da retórica de que seria possível ter usinas a gás natural não poluidoras através da CCS. Através deste discurso, o governo garantiu maioria nos debates sobre o tema. Segundo lembra TJERNSHAUGEN e LANGHELLE (2009), Jagland estabeleceu um padrão que foi seguido por seus sucessores, mantendo a CCS como um dos elementos chave na política de redução de emissões da Noruega. A viabilidade de Sleipner só foi possível graças a essa estratégia política.

Mas este não foi o único fator que contribuiu para o desenlace deste projeto. Para HENRIKSEN e OMBUDSTVEDT (2014), um projeto de CCS só terá sucesso se 3 condições forem observadas, sendo elas: (i) existência de uma política de taxação de carbono; (ii) um mercado de carbono; e (iii) uma regulação específica, gerando previsibilidade e estabilidade. E

estes fatores também podem ser observados, ainda que indiretamente, ao longo do desenvolvimento de Sleipner.

Em relação ao primeiro ponto, a Noruega possui uma política de taxaço de carbono vigente desde a década de 1990. Segundo RÓMAN e SCHOTT (2011), um dos principais motivadores para a implementação de Sleipner foi justamente a taxaço nacional do carbono, que exigiu a busca por soluço de abatimento do carbono.

Quanto à segunda condiço, à época de implementaço de Sleipner, em 1996, não existia um mercado de carbono implementado. Entretanto, a política vigente e as obrigaço impostas ao setor de óleo e gás foram suficientes para criar um atrativo financeiro. TJERNSHAUGEN e LANGHELLE (2009) complementam que o custo de implementaço deste projeto estava muito próximo ao custo que as empresas envolvidas teriam que pagar pelas emissões de carbono, sendo o principal motivador para seu desenvolvimento. Indubitavelmente, a existência de uma política consolidada de taxaço de emissões de carbono contribuiu para o resultado econômico positivo do projeto.

Para ARAÚJO e MEDEIROS COSTA (2021), o CCS só se torna economicamente viável se o CO₂ for transformado em um ativo econômico. Ou seja, a política de CCS deverá ser acompanhada de subsídios para a armazenagem ou penalidades para emissões. O CO₂ armazenado foi equivalente à quantidade que deveria ser neutralizada para que se evitasse a taxaço da produço de gás natural. Assim, mesmo que inexistisse um mercado formal de carbono, a política vigente possibilitou que o armazenamento de CO₂ fosse utilizado como mecanismo de abatimento de emissões e, conseqüentemente, de dispensa de taxaço.

Sobre a terceira condiço, apesar da supracitada atuaço política do primeiro-ministro norueguês na década de 1990, HENRIKSEN e OMBUDSTVEDT (2014) lembram que a regulaço norueguesa seguiu ainda embrionária até os anos de 2010. Contudo, Sleipner foi criado num contexto em que havia mecanismos de comando e controle, tais como a taxaço de carbono e regulaço específica para o licenciamento de instalaço de produço de gás natural, sendo que esta última serviu como base para o modelo regulatório do CCS. Com o intuito de ter uma referência regulatória, utilizou-se do ordenamento da Convenço para a Proteço do Meio Marinho do Atlântico Nordeste (OSPAR) e do Protocolo de Londres para armazenagem de CO₂. Como lembram ARAÚJO, *et al.* (2021), a estrutura regulatória norueguesa serviu de base para Diretiva do Parlamento Europeu para Captura e Armazenamento Geológico de Dióxido de Carbono²¹.

²¹ Directive 2009/31/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the geological storage of carbon dioxide and amending Council Directive 85/337/EEC, European Parliament and Council Directives

Além dessas três condições, outro fator que contribuiu para o sucesso de Sleipner foi a característica geológica do reservatório. Segundo RINGROSE (2018), a formação do reservatório e sua alta capacidade de contenção foram fatores que contribuíram para a eficiência de armazenamento.

Por fim, a adoção de políticas de taxação de carbono, aliada a um ambiente político favorável, mostrou que é possível alcançar a viabilidade econômica de projetos de CCS dedicados, ou seja, aqueles não vinculados a EOR, permitindo que investimentos dedicados sejam realizados e abrindo caminho para a implementação de projetos de pesquisa e desenvolvimento para o setor. Depois de Sleipner, novos projetos de CCS foram desenvolvidos em escala industrial na Noruega, possibilitando o desenvolvimento e a demonstração de novas tecnologias (RINGROSE, 2018). Entretanto, este cenário só se tornou possível através de articulação política e da construção de um discurso alinhando a CCS com a pauta ambiental do país.

3.3.3 Instrumentos de políticas públicas utilizados

Ao analisar o contexto de implementação de Sleipner, é possível verificar que houve a adoção de diversos instrumentos de políticas públicas simultaneamente, evidenciando um *policy mix* que permitiu o desenvolvimento e o sucesso do primeiro projeto de CCS em larga escala a nível mundial.

KRAFT e FURLONG (2018), como já citado, destacam que há diversos instrumentos de políticas públicas, que podem ser categorizados como (i) educação, informação ou persuasão, (ii) taxação e gastos, (iii) gestão pública, (iv) regulação e (v) mecanismos de mercado. Cada um desses instrumentos tem um objetivo fim e podem ser utilizados de forma individual ou combinada. Nitidamente, para a Noruega, é perceptível a presença de pelo menos quatro desses mecanismos.

A adoção da persuasão foi elemento essencial no desenvolvimento de uma política pública voltada para o CCS na Noruega. A estratégia utilizada pelo primeiro-ministro Jagland, nos anos 1990, ao construir um discurso favorável à implementação de projetos de CCS e alinhá-lo às políticas nacionais possibilitou confrontar a oposição política e arrefecer os ânimos dos ativistas ambientais regionais.

Um segundo instrumento identificado é a taxaço. Em que pese a adoço de uma política de taxaço de carbono não ter sido criada com o intuito de fomentar projetos de CCS, ela possibilitou a viabilidade econômica do projeto. De acordo com os estudos de ARAÚJO, *et al.* (2021) e TJERNSHAUGEN e LANGHELLE (2009), Sleipner só foi exequível uma vez que os custos de separação e injeção do CO₂ eram menores do que a taxa aplicável ao CO₂ não sequestrado.

O terceiro ponto a ser observado é a existência de uma regulação, ou, neste caso e como citado por HENRIKSEN e OMBUDSTVEDT (2014), de um embrião regulatório. Quanto este aspecto, há alguns prismas a serem observados.

Primeiro, cumpre destacar que o projeto Sleipner foi posto em prática anos antes da publicação da Diretiva do Parlamento Europeu para Captura e Armazenamento Geológico de Dióxido de Carbono. Ou seja, não havia um arcabouço regulatório definido para a UE. Apesar da Noruega não ser um país membro, faz parte do Espaço Econômico Europeu e possui diversas alianças com a UE para o desenvolvimento de políticas conjuntas (LÓPEZ e RAZAUSKAS, 2023), fazendo uso das diretivas da UE dentro de seu território.

Segundo, o estabelecimento de uma regulação para o setor de óleo e gás, restringindo o volume de gás autorizado a ser liberado na atmosfera, em licenças novas e naquelas já concedidas, exceto para casos de inviabilidade técnica (ARAÚJO, *et al.* 2021).

E, terceiro, as regras desenvolvidas para a implementação do CCS na Noruega serviram, justamente, como base para Diretiva do Parlamento Europeu para Captura e Armazenamento Geológico de Dióxido de Carbono.

Voltando aos instrumentos de políticas públicas, temos, por fim, a gestão pública. Não pode ser esquecido o fato de que a empresa que administrou e operou o projeto Sleipner foi a Statoil (atual EQUINOR), uma estatal norueguesa. ARAÚJO, *et al.* (2021) destacam que a atuação pública, através de uma empresa estatal, foi um dos elementos que viabilizaram este projeto. TJERNSHAUGEN e LANGHELLE (2009) elucidam, também, que a participação da Statoil neste projeto alavancou o portfólio ambiental da empresa, permitindo a expansão de suas atividades no Mar do Norte.

3.4 OS EUA E A IMPLANTAÇÃO DO 45Q

Segundo dados da CCS BRASIL (2023) e IEA (2020), os Estados Unidos da América são o país com a maior quantidade de projetos de CCS em operação no mundo, sendo responsáveis por aproximadamente 45% dos projetos implementados até agora. Somando-se a

isso, possuem uma malha dutoviária para transporte de CO₂ até os locais de armazenagem de aproximadamente 7.670 km (IEA, 2020), se posicionando como o país que mais investe em projetos de CCS. Contudo, o que está por trás deste comportamento?

Em 2008, foi instituída a Seção 45 do Código da Receita Federal dos Estados Unidos (45Q), que dispôs sobre a concessão de créditos tributários para empresas que armazenassem o CO₂. No momento de sua instituição, se os requisitos mínimos fossem atendidos, o programa previa a concessão de crédito de até USD 10,0/tCO₂ armazenada e com foco em EOR e de até USD 20,0/tCO₂ em instalações dedicadas para CCS.

Em 2018, através da Lei Orçamentária Bipartidária (do inglês *Bipartisan Budget Act*) houve um incremento dos valores para até USD 35,0/tCO₂ armazenada e com foco em EOR e até USD 50,0/tCO₂ em instalações dedicadas para CCS. Em 2022, após a publicação do Ato para Redução da inflação (do inglês *Inflation Reduction Act – IRA*), estes valores foram ampliados para até USD 130,0/tCO₂ e USD 180,0/tCO₂, respectivamente e nas hipóteses de captura direta atmosférica, posicionando os EUA na vanguarda das ações governamentais para incentivo do CCS (GLOBAL CCS INSTITUTE, 2020). Para ilustrar, o Serviço de Pesquisa do Congresso Estadunidense (CRS) estima que serão gastos, entre 2022 e 2032 o equivalente a US\$ 30,3 bilhões decorrentes de créditos tributários relacionados a projetos de CCS.

São incentivos expressivos que viabilizam economicamente projetos múltiplos de CCS, sendo reconhecido como a política mais efetiva atualmente para a atração de investimentos. Segundo GODDARD (2023), a estrutura do 45Q permite uma adequada remuneração dos investimentos e convivência dos combustíveis fósseis com políticas de redução de emissões de carbono. Segundo o CRS (2023), o 45Q tem por objetivo atrair e incentivar investimentos para o CCS. Através da distribuição de créditos tributários, foi possível direcionar esforços para a atração de projetos de CCS. Em complemento, EDMONDS, *et al.* (2020) sugerem que o 45Q possa ser uma forma das empresas terem um aprendizado subsidiado, ou seja, implementarem novas tecnologias com baixo custo, através da compensação recebida via créditos tributários.

Entretanto, como alertou POLLAK, *et al.* (2009), por conta da divisão e independência dos entes dentro da constituição norte americana, cada estado ganha papel importante nesta discussão, uma vez que apenas a previsão de investimentos federais não seria suficiente para o desenvolvimento de projetos de CCS. Seria necessário também que cada estado regulamentasse o CCS e desenvolvesse políticas climáticas próprias, de forma a incentivar iniciativas voltadas para a captura e o armazenamento de CO₂. A título exemplificativo, FAN, *et al.* (2018) destacam que os investimentos necessários para transformar termelétricas alimentadas a carvão

existentes em instalações aptas para a captura e armazenagem de carbono só teriam valor presente líquido positivo, ou seja, se pagariam, se fossem laureados com os créditos previsto no 45Q.

3.4.1 Os instrumentos de política pública de suporte ao 45Q

Os EUA são, inequivocamente, a maior potência econômica global, sendo o segundo maior consumidor de energia elétrica no mundo, ficando atrás apenas da China (IEA, 2021). Também são os maiores produtores e consumidores de petróleo do mundo (EIA, 2023) e o terceiro maior consumidor de carvão global (IEA, 2021). Segundo a EIA, aproximadamente 80% da matriz energética dos EUA é proveniente de fontes fósseis, evidenciando a dependência do país face a combustíveis de alto carbono.

Em 2008 foi publicado o *Energy Improvement and Extension Act*. Esta lei introduziu no Código da Receita Federal dos EUA diversos dispositivos relacionados com a conservação e produção de energia e com o aumento da Receita Federal. TARUFELLI, *et al.* (2021) reforçam que o *Energy Improvement and Extension Act* teve como objetivo encorajar a produção de energia limpa e reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

Dentre as disposições do *Energy Improvement and Extension Act* está a previsão para autorização de projetos de energia relacionados com carbono, incluindo o CCS. Esta lei originou o 45Q, que trata da concessão de créditos tributários para empresas que armazenassem o CO₂. Em 2008, as discussões acerca do CCS ainda poderiam ser consideradas como iniciais, uma vez que os debates acerca do aquecimento global e das mudanças climáticas, apesar de importantes, ainda orbitavam em torno dos compromissos assumidos pelos países desenvolvidos na COP 03. Assim, o caráter embrionário do 45Q e a ausência de regulação dificultavam o avanço de programas de CCS, conforme lembrado por HENRIKSEN e OMBUDSTVEDT (2014).

Para se ter uma ideia de como se avançava a passos lentos, uma análise feita por POLLAK, *et al.* (2009), quantificou o perfil de cada estado norte americano acerca da CCS. Segundo os achados deste estudo, foi possível identificar quatro situações no que tange à regulação de CCS e às políticas relativas a mudanças climáticas, conforme quadro resumo da Quadro 2:

Quadro 2 – Panorama dos estados norte-americanos quanto à regulação de CCS e políticas climáticas

MATURIDADE REGULATÓRIA	Características dos estados
Possui apenas regulação de CCS	Estados governados por partidos conservadores e mais intensivos em consumo energético
Possui apenas políticas climáticas	Estados governados por partidos liberais e menos intensivos em consumo energético
Não possuem regulação de CCS ou políticas climáticas	Estados com menor renda per capita e com consumo energético maior do que a mediana
Possuem regulação de CCS ou políticas climáticas	Estados com maior renda per capita e que apresentaram maior crescimento econômico. Buscam aliar a CCS com o controle de mudanças climáticas

Fonte: Elaboração própria com dados de POLLAK, *et al.* (2009)

Além disso, POLLAK, *et al.* (2009) esmiuçaram outra característica dos estados norte-americanos: se eram produtores ou não de combustíveis fósseis, conforme Tabela 1:

Tabela 2: Distribuição de políticas por Estado.

Políticas Estaduais	Nº de Estados	Qtd de Estados produtores de petróleo	Qtd de Estados produtores de carvão
Apenas CCS	16	15	15
Apenas de Emissões	9	1	1
Ambas	11	6	4
Nenhuma	14	8	4

Fonte: Elaboração própria com dados de POLLAK, *et al.* (2009)

Como pode ser observado, o avanço das políticas estaduais estava diretamente relacionado à característica política e econômica dos estados. Aqueles estados mais conservadores e que tinham forte presença de indústrias relacionadas com a produção de fósfil avançaram mais rapidamente na construção de um arcabouço regulatório voltado para o CCS, ao passo que estados mais liberais e menos dependentes de combustíveis fósseis partiram para uma estratégia com foco em políticas de redução de emissões.

POLLAK, *et al.* (2009) corroboram o entendimento que a CCS só seria viável se aliada a uma política climática séria, que estipulem limites de emissão e/ou que taxem as emissões, viabilizando os projetos de CCS. Fora isso, despejar o CO₂ diretamente na atmosfera sempre será mais barato do que capturá-lo e armazená-lo. TARUFELLI, *et al.* (2021), apesar de entenderem que os subsídios beneficiariam apenas uma parcela limitada dos emissores

industriais, também ratificam o entendimento de que a política de concessão de créditos tributários é essencial para o desenvolvimento e viabilidade de projetos de CCS.

Com a assinatura do Acordo de Paris, as discussões começaram a ganhar maior relevância política. Em uma escala global, EUA e China dividiram os maiores desafios para a descarbonização. O tamanho de suas economias, o perfil energético e a pressão internacional fazem com que os países estejam no centro das atenções. Limitando a análise aos EUA, é necessário lembrar que o país assumiu, na forma de NDC's, o compromisso de reduzir suas emissões no ano de 2030 a níveis entre 50% e 52% inferiores ao ano de 2005 (EUA, 2021). Para o atingimento desta meta, o CCS é sugerido como uma das medidas para redução das emissões dos setores de energia e da indústria.

A publicação do 45Q se mostrou como uma solução para proteger o perfil energético atual, ancorado em combustíveis fósseis, garantindo a hegemonia energética do país, mas, simultaneamente, contribuindo com as metas de longo prazo definidas pelo governo estadunidense e diminuindo a pressão externa referente a sua política energética. O CCS se apresentou como uma alternativa de, no médio prazo, amenizar os riscos relativos à segurança energética, propondo um “pouso suave” para os combustíveis fósseis (HU e WU, 2023).

Neste mesmo sentido, GODDARD (2023) reforça que o CCS terá papel importante na política de redução de emissões dos EUA, destacando ser necessária uma coalisão interna para suportar o desenvolvimento de projetos de CCS, uma vez que riscos políticos, técnicos e econômicos podem prejudicar o desenvolvimento de tais projetos.

Mais recentemente, mudanças no 45Q trouxeram maior atratividade para o CCS nos EUA. Segundo CUPERTINO *et al.* (2021), os EUA detinham, em 2021, 60% de toda a capacidade mundial de armazenagem de CO₂. Esta concentração está relacionada com os incentivos tributários decorrentes do 45Q. Importante destacar que as mudanças recentes nos incentivos refletiram diretamente a plataforma política dos mandatários presidenciais, conforme lecionam ARLOTA e MEDEIROS COSTA (2021).

Cabe notar que a política pública norte-americana direcionada para o CCS refletiu diretamente o alinhamento político do líder de estado. Este alinhamento ficou claro após a publicação da *Bipartisan Budget Act* de 2018, que foi o primeiro aumento aos subsídios previstos no 45Q e alinhados à política de Donald Trump, que tinha como meta o aumento dos investimentos em infraestrutura e a consequente geração de empregos. O *Inflation Reduction Act*, de 2022 também refletiu a plataforma de governo do sucessor de Trump, Joseph Biden, que tem como uma de suas metas avançar nas questões ambientais, mas resguardando a economia nacional e protegendo a inflação.

Nitidamente, a instituição do 45Q e suas recentes revisões foram decorrentes de uma estratégia do governo dos EUA de garantir a segurança energética e, ao mesmo tempo, manter algum foco nas políticas climáticas. Para um país intensivo em emissões de carbono, a CCS surge como uma solução de curto prazo que (i) garante a estabilidade e continuidade de sua matriz energética e (ii) viabiliza projetos de infraestrutura e contribuem para o crescimento econômico. A concessão de créditos tributários via 45Q foi uma solução inteligente para viabilizar projetos relacionados ao CCS.

3.4.2 Instrumentos de políticas públicas utilizados

Assim como para Sleipner, é possível identificar diversos elementos de políticas públicas no estabelecimento do 45Q. como (i) regulação, (ii) gestão pública e (iii) educação, informação ou persuasão.

Inicialmente, destaca-se a criação de um mecanismo de mercado para incentivar o desenvolvimento de projetos de CCS. Como já citado, o 45Q permitiu que as empresas investissem em soluções para captura e estocagem de CO₂ a um custo mais baixo (EDMONDS, *et al.* 2020). Este ponto é reforçado por FATTOUH, *et al.* (2024), que observam que a solução adotada no 45Q buscou, através de créditos e subsídios, incentivar o desenvolvimento de projetos de CCS. Esta possibilidade só se mostrou tangível em decorrência da política de créditos de carbono, em que pese o receio de um incentivo econômico como esse criar uma sobre oferta de instalações de CCS, impactando no resultado econômico esperado.

Observa-se, além disso, a persuasão e a regulação andando em conjunto. POLLAK, *et al.* (2009) analisaram justamente o perfil do avanço do arcabouço regulatório em cada estado dos EUA. Pelo resultado da pesquisa, infere-se que as características de cada um dos estados, tais como vocação energética, liderança política e participação no produto nacional bruto, foram essenciais para o desenvolvimento da regulação de CCS. Estados mais conservadores, com forte presença de produtores fósseis tiveram mais agilidade para a formulação da regulação de CCS, ao passo que estados mais liberais, sem a forte atuação de produtores de fósseis, optaram por construir uma regulação voltada para a redução de emissões. Assim, identifica-se que a própria vocação dos estados direcionou à construção da regulação, sendo um elemento persuasivo na definição da política pública.

Por fim, é importante mencionar a capacidade de gestão pública. Conforme bem analisa GODDARD (2023), o 45Q está alinhado com o perfil energético nacional. O 45Q não foi apenas um mecanismo para viabilizar financeiramente projetos de CCS, mas também foi

uma ferramenta do governo para garantir a continuidade do uso dos combustíveis fósseis alinhada a uma política de redução de emissões e de cumprimento das NDC's.

4 DESAFIOS EM POLÍTICAS PÚBLICAS PARA O DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS DE CCS NO BRASIL

A construção de uma política pública para o desenvolvimento de projetos de CCS perpassará por diversos desafios. Como espera-se apresentar na sequência desta seção, os obstáculos não se limitam apenas à formulação de uma política energética, mas também envolvem a coordenação desta com políticas econômica, industrial, tecnológica, ambiental e social.

Como observado na Noruega, por advento do campo de Sleipner, ou nos EUA, com a implantação do 45Q, o desenvolvimento de projetos de CCS está intrinsecamente ligado a fatores como comprometimento institucional do estado, contrapartidas financeiras, que podem vir através de subsídios diretos, créditos tributários ou até mesmo taxaço de carbono, incentivando alternativas para a redução de emissões, e uma política pública que, se não clara, pelo menos se mostre coerente com o que se propõe.

No Brasil, os desafios serão complexos. Seja pelo atual estágio do arcabouço regulatório, seja pelo histórico de políticas públicas cíclicas - políticas atreladas a interesses de governo e não de estado - a construção de uma política pública nacional exigirá esforços. A atuação institucional, verificada na Noruega e Estados Unidos, bem como o alinhamento com os compromissos firmados através de NDC's serão essenciais para que se tenha êxito no estabelecimento desta política. A consolidação de um mercado de carbono e/ou a taxaço de emissões também será um caminho crítico.

Em adição, a percepção pública e a mitigação dos riscos deverão ser bem trabalhadas. Quanto ao primeiro ponto, será necessário evidenciar que uma política pública voltada para o desenvolvimento de projetos de CCS:

- (i) Esteja alinhada com os objetivos climáticos nacionais;
- (ii) Não prejudicará o desenvolvimento de alternativas para a redução ou neutralização de emissões;
- (iii) Contribuirá para manter o país competitivo perante as potências econômicas globais; e
- (iv) Beneficiará, ou não prejudicará, as localidades afetadas pelos projetos de CCS.

Em relação à mitigação dos riscos, a participação do governo na governança dos projetos, a construção de um arcabouço jurídico regulatório e a concessão de benefícios podem contribuir para o desenvolvimento de projetos de CCS no país.

Este capítulo buscará identificar a existência de uma lacuna regulatória e evidenciar um ambiente de insegurança para investimentos relacionados com o CCS. Também permeará pelas lições aprendidas na implementação de Sleipner e do 45Q, explorando de forma crítica os aspectos levantados no capítulo anterior. Por fim, abordará os elementos críticos que deverão ser considerados na elaboração de uma política pública nacional com foco no CCS.

4.1 LACUNAS REGULATÓRIAS E INSEGURANÇA PARA INVESTIMENTOS

Como já mencionado, o Brasil assumiu compromissos desafiadores na forma de NDC's. As metas definidas implicam na redução de suas emissões de carbono em 53% até 2030 quando comparado com 2005. Preservação de áreas florestadas, reflorestamento, agropecuária sustentável e aumento da participação de biocombustíveis e outras fontes de energia não fósseis são elementos que estão na pauta de descarbonização nacional.

Entretanto, a redução de emissões não é o único desafio nacional. Problemas de infraestrutura, saneamento básico, acesso à energia e pobreza ainda são fantasmas que perambulam a sociedade brasileira. Assim, a busca por soluções de baixo carbono ganha contornos ainda mais críticos, uma vez que devem considerar não apenas o cumprimento das NDC's, mas também como a população será afetada.

O Brasil possui aproximadamente 47% de sua matriz energética renovável (EPE, 2022), o colocando em posição de destaque dentre todas as nações, sendo o país mais avançado neste quesito. Todavia, esta posição também traz um desconforto: qual será o custo, e aqui, não se pode considerar apenas o custo financeiro, mas também o social e estratégico, de se avançar, em tão curto tempo, ainda mais em fontes renováveis? O país possui condições de expandir a oferta de biocombustíveis ou de biomassa até o limite da demanda? Dependendo da tecnologia de outras nações para aumentar seus parques eólicos e solares seria um caminho viável? E como ficariam as reservas de petróleo? Seriam aposentadas? Já há bioprodutos em quantidade suficiente e custos razoáveis para substituição dos produtos de origem fóssil? Estas são apenas algumas das possíveis perguntas que deverão guiar os formuladores de políticas públicas. Independentemente da pergunta a ser feita, um fato é claro: o Brasil não possui regulação voltada para o CCS.

Conforme ensina CHANG (1997), mesmo que muitas vezes seja indesejada, a regulação é necessária para um mercado justo, sendo que a regulação pode ser formulada pelo governo ou emanar da autorregulação dos mercados. Além disso, a regulação serve para criar mercados, fomentar investimentos e desenvolver setores. Contudo, a regulação está sujeita a

falhas governamentais e a interesses individuais. As falhas governamentais e os interesses individuais estão, muitas vezes, relacionados com ciclos de políticas públicas. Nesta esteira, BIRKLAND (2020) esclarece que os ciclos são indesejáveis e frustrantes, mas estarão sempre presentes. Os governos veem sempre os problemas que estão à sua frente, aqueles claros, cristalinos. Uma vez que determinado assunto deixe de ser um problema “prioritário” para aquele momento, ele será passado para trás. O grande desafio é manter este assunto na pauta crítica das discussões políticas.

Para o CCS, este será um ponto crítico. Os investimentos são remunerados no longo prazo. A falta de uma regulação específica combinada com os ciclos políticos são elementos de risco para investidores, podendo causar aversão das empresas para projetos dentro deste contexto. BERG (2001) traz uma abordagem prática para os problemas de regulamentação. Segundo ele, o sistema regulatório é um fator determinante para os investidores, garantindo credibilidade e gestão de riscos. Regulamentações estáveis, claras e que gerem baixo custo regulatório tendem a criar um cenário mais atrativo para investidores. Ainda segundo BERG (2001), um dos principais desafios atuais é de como os mercados conseguiriam atrair e competir pelos investimentos para projetos de infraestrutura.

Sob este prisma, melhores práticas de regulamentação devem ser observadas, garantindo, principalmente, transparência, previsibilidade e participação dos agentes envolvidos. A governança e políticas regulatórias assumem papel central nos mercados, sendo fatores críticos para a tomada de decisão dos investidores. Os investidores comparam mercados, além de avaliarem a percepção de risco internacional, confiança nas instituições, condições gerais da economia, fatores de mercado (tais como insumos, custo de mão de obra e disponibilidade de recursos), condições básicas da indústria (oferta e demanda) e políticas regulatórias.

Evidentemente, o país carece de qualquer arcabouço jurídico-regulatório sobre o tema. Não é uma questão de o modelo existente ser eficiente ou não, mas sim o fato de não haver nenhum modelo regulatório em prática. Ainda tramitam no Congresso Nacional os projetos de lei 1.425/2022 e 4.516/2023, que visam estabelecer o marco legal para o CCS no país. Este seria um primeiro passo para o estabelecimento de uma política pública voltada para o desenvolvimento de projetos de CCS. Contudo, é importante destacar que a existência de um marco jurídico-regulatório não é a solução dos problemas. Se não for bem construído, pode ser a “pá de cal” para qualquer pretensão de investimentos relacionados ao CCS. Reforçando tal visão, FATTOUH, *et al.* (2024), ao analisarem a cadeia de valor para o CCS, identificaram a necessidade de serem estabelecidos mecanismos para suportar investimentos e viabilizar a o

desenvolvimento de novos projetos, sendo a construção de um arcabouço regulatório o principal, mas não o único, mecanismo.

VAN GESTEL e HERTOOGH (2006) alertam que a regulação pode trazer um fardo para os diversos agentes impactados direta e indiretamente. Destacam que este fardo pode ser informacional, relacionado aos gastos necessários para juntar as informações necessárias para atender às exigências regulatórias, ou pelo esforço, aquele correspondente ao trabalho para se cumprir a regulação. Desta forma, reforçam que uma regulação deve considerar: (i) custo-benefício esperado; e (ii) o impacto sistêmico (em outras palavras, como a alteração, supressão ou adição regulatória afetarão o modelo regulatório vigente; ações isoladas podem aumentar o fardo, uma vez que tendem a desequilibrar o modelo em exercício).

A ausência de regras claras é um inibidor para investimentos de CCS no país, justificando o porquê de apenas dois projetos terem sido implementados até o momento e apenas quatro novos projetos terem sido anunciados. Ao contrário do que sustenta CUPERTINO, *et al.* (2021), o fato do país possuir legislação ambiental avançada e regras claras para a exploração e produção de petróleo, estas não devem ser confundidas com o CCS. É necessário que se criem regras específicas que definam não apenas critérios de projeto e licenciamento, mas responsabilidades e regras de monitoramento e eficiência da armazenagem. Sobre este aspecto, MARKUSSON, *et al.* (2011) são cirúrgicos ao apontarem que o desenvolvimento de projetos de CCS não encontra apenas barreiras econômicas ou tecnológicas. As incertezas políticas são relevantes e um fator decisivo para o investidor na hora de mensurar o risco. A existência de um arcabouço regulatório, apesar de não resolver a instabilidade política, pelo menos define as regras e bases para o desenvolvimento do CCS, permitindo uma melhor percepção dos riscos objetivos para os investidores.

Em que pese a estabilidade jurídico regulatória trazida pela regulação, esta não é o único instrumento para o estabelecimento de uma política pública. Conforme a ser observado na seção seguinte, outros mecanismos foram adotados na Noruega e nos EUA e lograram êxito na construção de uma política pública que trouxesse resultados efetivos na implementação de CCS.

4.2 LIÇÕES DOS CASOS EUA E NORUEGA PARA EXAME DO CCS NO BRASIL

A busca por referências, ou no inglês *benchmark*, ocorre em diversos campos de pesquisa, tais como direito, ciências sociais, medicina, e não seria diferente no estudo de políticas públicas. A análise de *benchmarks* facilita a absorção de lições aprendidas e pode

direcionar o *policy maker* para um caminho menos tortuoso. Contudo, a busca para alcançar certos *benchmarks* pode deixar a impressão de que outros foram preteridos e levantar questionamentos quanto ao porquê dessa ou daquela escolha.

Este trabalho não tem a pretensão de limitar a análise comparativa à Noruega e aos EUA, tampouco de refutar outros *benchmarks*. Entretanto, cabe repisar o que embasou a escolha dessas duas políticas como referência para esta pesquisa:

- EUA: maior produtor de petróleo do mundo; país com maior quantidade de projetos de CCS em desenvolvimento ou já implementados; possui grande desafio na descarbonização, uma vez que é o segundo maior consumidor energético no planeta e sua matriz energética é 80% dependente de combustíveis fósseis; sua política de créditos tributários é reconhecida como a maior política pública para desenvolvimento de projetos de CCS no mundo.
- Noruega: o campo de SLEIPNER foi o primeiro projeto dedicado de CCS em larga escala no mundo; a regulação desenvolvida serviu como base para a construção da diretriz europeia para projetos de CCS.

A Noruega é um país pioneiro no CCS, em que esta tecnologia surgiu como alternativa para resolver um paradoxo existente: como continuar na vanguarda das discussões ambientais, mas atender, simultaneamente, a demandas internas relacionadas com a energia e economia do país? Dentro deste dilema, o CCS caiu como uma luva (ou cola), aliando a aptidão técnica do setor de óleo e gás, com o interesse exploratório dos campos de gás de Sleipner, a necessidade de estabelecer regimes para redução de emissões e o interesse público em promover uma solução que conciliasse a ambição ambiental do país com interesses energéticos e empresariais. Da implementação de Sleipner, três pontos cruciais devem ser observados: (i) posicionamento do chefe de estado em relação ao CCS; (ii) a política de taxaço de carbono implementada no país na década de 1990; e (iii) os interesses nacionais na manutenção da exploração de combustíveis fósseis.

O primeiro aspecto tem caráter relevante, uma vez que, sem ele, dificilmente seria possível avançar com o desenvolvimento de um política pública voltada para o CCS. Voltando a alguns pontos já abordados, no início da década de 1990 a Noruega se viu frente a um grande dilema: prosseguir com a exploração e produção do gás natural e seu aproveitamento em usinas termoelétricas ou continuar com sua política de geração de energia por usinas com zero emissões. A mudança do perfil energético era uma bandeira definida pelo governo norueguês (TJERNSHAUGEN e LANGHELLE, 2009) e estava alinhada com as metas ambientais definidas e defendidas pelo país. Contudo, a produção de Sleipner tinha não apenas valor

econômico, mas também político, uma vez que suas reservas garantiriam, além de um lucro para a Statoil, empresa estatal norueguesa do setor de óleo e gás, maior estabilidade energética, dado que a produção de gás natural alimentaria uma usina geradora de energia elétrica a gás natural.

Para resolver esta questão, o poder político foi essencial. Através da construção de um discurso alinhado aos anseios ambientais, o então primeiro-ministro norueguês conseguiu constituir apoio da maioria dos partidos. Adotar o CCS como um mecanismo de contribuição para os objetivos de descarbonização do país, posicionando-o não como uma tecnologia que beneficiaria a produção de óleo e gás, mas como uma alternativa que garantisse a estabilidade energética e contribuiria para o controle climático foi o grande legado de Sleipner. Segundo LIPPONEN, *et al.* (2017), passados mais de 20 anos da implementação de Sleipner, o governo norueguês ainda mantém seu apoio aos projetos de CCS.

O segundo aspecto a ser observado é a existência de uma política de taxação de carbono, implementada no país a partir de 1991. Conforme destacam TJERNSHAUGEN e LANGHELLE, 2009, a produção de gás natural de Sleipner era rica em CO₂. Para que a Statoil, operadora do campo, pudesse produzir o gás natural, ela teria que recolher uma taxa por cada tonelada de CO₂ despejada na atmosfera, a um custo estimado de US\$ 80 milhões. Entretanto, o valor para implementação do projeto de CCS seria equivalente a esse montante. Desta forma, a política de taxação do carbono permitiu a viabilidade econômica do projeto de CCS, uma vez que os gastos com o desenvolvimento do CCS se equiparavam aos custos com a taxa sobre o carbono.

Quanto ao terceiro aspecto, é importante destacar que se trata de uma característica comum entre Noruega, EUA e Brasil: possuir um setor de óleo e gás economicamente e tecnologicamente relevante. A mudança de discurso político e a flexibilização para a permissão da operação de novas usinas de energia elétrica geradas por fontes de combustível fóssil refletem a importância do setor de óleo e gás para a Noruega. A necessidade de continuar apoiando a indústria nacional, a relevância econômica e a aderência da solução proposta à política ambiental norueguesa foram elementos relevantes para justificar o apoio do país para o CCS. Provavelmente, e aqui trata-se de mera especulação, se o setor não fosse importante, ou se a tecnologia não conectasse o setor com ambos os problemas públicos (relembrando: descarbonização e segurança energética), o CCS não teria tido tanto êxito.

Quanto aos EUA, é possível identificar um contexto distinto para o CCS. Ele surge como uma forma de preservar a utilização de combustíveis fósseis pelo país, mas ciclos políticos induziram mudanças nas políticas. Para os Estados Unidos, é importante destacar dois

aspectos: (i) política de incentivos financeiros para projetos de CCS, através de concessão de créditos de carbono; (ii) interesses estaduais no desenvolvimento de políticas públicas voltadas para o CCS.

Em relação ao primeiro ponto, este é o maior destaque do 45Q. Através de uma política consistente de concessão de créditos tributários, foi possível observar o desenvolvimento de projetos de CCS ao longo do território norte-americano. Segundo LORIA e BRIGHT (2021), o crescimento em projetos de CCS implementados nos últimos anos se deve, principalmente, à publicação do 45Q, que permitiu uma maior previsibilidade quanto ao retorno financeiro esperado.

As recentes alterações na política, que reajustaram os valores e modificaram alguns critérios tendem a manter os EUA como referência no desenvolvimento de projetos de CCS. Importante destacar que as mudanças realizadas no 45Q possuíram forte alinhamento político. Em 2018, o *Bipartisan Budget Act* buscou incentivar investimentos em infraestrutura, como uma das plataformas do governo de Trump.

Desta forma, o valor do crédito foi aumentado, bem como foi alterado as condições de término do CCS, que, anteriormente, era atrelado ao volume estocado e, em 2018, passou a ser por tempo (12 anos). Já em 2022, por meio do *Inflation Reduction Act*, Biden, assim como seu antecessor, elevou o valor do crédito tributário, mas separou o CCS com foco na DAC das demais, dando maior destaque e concedendo maior benefício para esta modalidade, reforçando o alinhamento com a política climática assumida por seu governo.

Em relação ao segundo ponto, POLLAK, *et al.* (2009) identificaram que os estados mais beneficiados pela indústria fóssil foram aqueles que mais rápido adequaram suas políticas estaduais para o desenvolvimento do CCS. Reforçando o posicionamento de HU e WU (2023), o CCS surgiu como uma alternativa para uma transição energética suave, permitindo que os estados avançassem para uma economia menos intensiva em carbono, mas sem abandonar ou romper com os combustíveis fósseis.

Como visto, algumas lições podem ser tiradas da análise comparativa com a Noruega e com os EUA, mas, talvez, a mais importante esteja relacionada com o alinhamento político e o posicionamento institucional adotado ao longo do desenvolvimento das respectivas políticas públicas. Em que pese ser relevante para discussão as aptidões nacionais, como a vocação e representatividade do setor de óleo e gás, e a existência de elementos financeiros que contribuam para o desenvolvimento de projetos de CCS, a criação de uma política pública direcionada para o tema dependerá, inicialmente, do seu alinhamento político com governantes e com a maioria política do Congresso Nacional.

4.3 CONSTRUINDO UMA POLÍTICA PÚBLICA PARA O CCS NO BRASIL

BIRKLAND (2020) ensina que a política pública é qualquer ação do governo para resolver um problema público. Esta ação pode vir através de diferentes níveis de atuação e por diversas formas. Entretanto, resolver um problema público não é tão simples quanto possa parecer. Diversos interesses se misturam. Visões políticas, setoriais e, até mesmo, pessoais emergem das discussões centradas nos problemas públicos. E fica a questão: como resolver?

KRAFT e FURLONG (2018) defendem que a definição do problema público e o estabelecimento de uma agenda são os elementos mais importantes para se estabelecer uma política pública. Claramente, o Brasil possui um problema público que precisa ser tratado: como resolver a questão das emissões de gases causadores do efeito estufa? E este problema se desdobra em diversos “subproblemas”, tais como: qual será o papel do governo como o desenvolvedor de políticas públicas? Como cada setor econômico contribuirá, dentro de sua responsabilidade e capacidade competitiva, pela redução de emissões? Será possível o atingimento das metas sem comprometer a segurança energética e o acesso à energia?

Dentro deste contexto, o CCS surge como um aliado para a solução parcial deste problema público. Longe de ser a “bala de prata”, o CCS possui condições de contribuir parcialmente para a neutralização de parcela das emissões. Conforme já destacado, projeta-se que o CCS tenha condições de neutralizar até 32% das emissões do setor energético brasileiro (CCS BRASIL, 2023). Contudo, para que seja efetivo, é preciso que se defina uma política pública específica, de forma a garantir a previsibilidade e a atração de investimentos.

MARKUSSON, *et al.* (2011) elencaram alguns desafios que deveriam ser pensados pelo *policy maker*, sendo eles: (i) diversidade de rotas para o CCS; (ii) segurança no armazenamento; (iii) velocidade e propagação para desenvolvimento e implementação; (iv) integração entre sistemas; (v) viabilidade econômico-financeira; (vi) cenário político e regulatório; e (vii) aceitação pública.

Quanto ao primeiro desafio, o CCS pode ser com fins de EOR, BECCS, CCUS, DAC, dentre tantas outras siglas ou nomenclaturas. Definir o limite da política pública é um elemento importante para dar agilidade e segurança. Pior do que não cobrir todas as possibilidades, é esperar que todas as respostas surjam para, então, se implementar uma política pública. Conforme destacado por HENRIKSEN e OMBUDSTVELDT (2014), o estado possui papel relevante no desenvolvimento de projetos de CCS, seja atuando como desenvolvedor de

políticas ou regulador, seja no engajamento de projetos, dando suporte público ou atuando como facilitador.

A segurança no armazenamento é a segunda incerteza a ser avaliada. Há uma preocupação legítima com a capacidade de estanqueidade dos reservatórios geológicos e com o monitoramento contínuo. Entretanto, a tecnologia necessária para este fim já é utilizada há mais de 40 anos no setor de óleo e gás, tendo se mostrado mais do que eficiente e adequada (CUELLAR-FRANCA, *et al.* 2015; GARBA e GALADIMA, 2020; NAGABHUSHAN, *et al.* 2021). No Brasil a situação também não é diferente, com o país figurando com uma das referências mundiais no desenvolvimento de tecnologias para o setor de óleo e gás.

O terceiro desafio a ser considerado é velocidade e a propagação para desenvolvimento e implementação de projetos de CCS. LIPPONEN, *et al.* (2017) reforçam a importância do tempo. Projetos de CCS podem demorar até 10 anos para serem implementados, se as instalações de armazenagem ou a EOR não estiverem disponíveis. Aguardar para que todas as possibilidades sejam estruturadas significa aguardar a iniciativa privada, impactando no desenvolvimento de projetos. A demora no desenvolvimento de projetos e a baixa adesão pode impactar no desenvolvimento e/ou aprimoramento de tecnologias, conforme destaca MARKUSSON, *et al.* (2011). Assim, o problema não seria apenas a demora na execução dos projetos, mas o gargalo tecnológico que a falta de atratividade e engajamento podem gerar, reduzindo o retorno financeiro e travando a implementação de projetos de CCS.

Outro *driver* importante é a integração de projetos. Pulverizar soluções pode gerar ineficiência e diminuir o retorno esperado, além da concorrência de mão de obra e esforços, aumentar o custo unitário dos projetos.

Conforme ventilado pela IEA (2023), a criação de hubs é um caminho que deve ser considerado na formulação de políticas públicas voltadas para o CCS. Esta alternativa permitiria a concentração dos esforços em projetos cuja rentabilidade seja, em termos probabilísticos, maior. Desta forma, além da questão financeira, endereçaria também o problema tecnológico, uma vez que, como já observado, a capacitação tecnológica se concentra no setor de óleo e gás. A formação de hubs e a integração de projetos permitiria o desenvolvimento de projetos de CCS aproveitando o conhecimento maduro de um determinado setor, sem que houvesse a necessidade de treinamento ou compartilhamento tecnológico.

Um quinto problema a ser tratado é a viabilidade técnico-econômica de projetos de CCS. TJERNSHAUGEN e LANGHELLE (2009), RÓMAN e SCHOTT (2011), HENRIKSEN e OMBUDSTVELDT (2014), ARAÚJO e MEDEIROS COSTA (2021), TARUFELLI, *et al.* (2021) e GODDAR (2023), dentre tantos outros, apontam que os projetos de CCS só são

economicamente viáveis se houver algum tipo de contrapartida financeira. Esta contrapartida pode ser apresentada através de subsídios diretos, créditos tributários, que permitiram que o executor do projeto aufera um ganho em decorrência da implementação da instalação.

As contrapartidas podem vir através de taxaço de carbono ou de mecanismos como limitação de emissões. Nestes casos, os projetos de CCS teriam sua atratividade pelo potencial exploratório, ou seja, o detentor da infraestrutura de CCS poderia explorá-la economicamente, para que terceiros conseguissem ter um menor custo em decorrência do CO₂ envolvido. Qualquer que seja o mecanismo, é importante que esteja regulado. Um mercado de carbono estruturado também seria uma alternativa. A captura e armazenagem de carbono geraria créditos, que poderiam ser comercializados no mercado regulado.

Não se pode esquecer do cenário político e regulatório. Em relação ao cenário político, é importante relembra os aprendizados com a Noruega e os EUA. A viabilidade de Sleipner e o sucesso do 45Q só foram possíveis por conta do alinhamento da política pública com o discurso do líder de governo e com interesses econômicos.

Para o caso brasileiro, é importante que a proposta de política pública encontre eco no Congresso Nacional, ou nem saíra do papel. Para que isso ocorra, deverá ter o apoio de frentes parlamentares importantes, como do agronegócio e da indústria, ou seja, deverá convergir para seus interesses. Uma política pública idealista, mas sem alinhamento prático, tende a padecer antes mesmo de ser levada à escrutínio.

Quanto ao segundo ponto, a ausência de uma regulação específica para o tema e os bem definidos ciclos políticos nacionais são sinônimos de instabilidade e risco. Somando-se a isso, um mercado de carbono incipiente e ausência de mecanismos de taxaço de carbono, reduzem a previsibilidade quanto ao retorno financeiro. O investidor, ao avaliar sua carteira, buscará mensurar o retorno esperado para uma determinada exposição a risco. Ocorre que o Brasil se encaixa no pior cenário: risco elevado, diante da incerteza regulatória e dos ciclos políticos e impossibilidade de se medir o retorno, haja vista a ausência de mecanismos de taxaço de carbono ou um mercado regulado eficiente. Para que o país evolua neste assunto, será necessária a construção de um arcabouço jurídico regulatório robusto, que garanta ao investido um certo grau de previsibilidade, independentemente das mudanças de governo.

Outrossim, a definição de políticas econômicas para o tratamento de emissões de CO₂ também será necessária. Apenas a estabilidade política e regulatória, sem o retorno econômico, não será suficiente.

Por fim, há a percepção pública. PEREIRA SILVA e MEDEIROS COSTA (2021) elucidam que a aceitação pública é difícil de conseguir, porém, fácil de perder. O CCS ainda

não é percebido pela massa pública como uma alternativa para a neutralização de emissões e um aliado das políticas públicas relativas às mudanças climáticas. Pelo contrário, o desconhecimento acerca do CCS e sua relação íntima com a indústria de energia fóssil o coloca em posição de difícil aceitação.

Inicialmente, o CCS deverá ser percebido com um instrumento digno de figurar dentro de uma política pública voltada para a redução e neutralização de emissões (MARKUSSON, *et al.* 2011). Ademais, será necessário o suporte de representantes da sociedade civil, seguindo a sugestão de LIPPONEN, *et al.* (2017). A participação da comunidade afetada, organizações não-governamentais e influenciadores políticos será essencial para a implementação de uma política voltada para o CCS e, conseqüentemente, para o desenvolvimento de projetos de CCS. O caráter educacional será fundamental. Explicar os benefícios do CCS, seus impactos e esclarecer mitos deverão figurar como elementos de destaque para garantir a aceitação pública.

A construção de uma política pública deveria idealmente transpor esses sete desafios, tais como:

- Limitar o campo de atuação da política. Uma política abrangente demais pode gerar uma concorrência pelos mesmos recursos;
- Criar mecanismos para garantir a segurança da armazenagem, estabelecendo critérios técnicos, rotinas de inspeção e construindo uma governança para o monitoramento do reservatório, podendo, inclusive, passar para o estado a responsabilidade pelo monitoramento;
- Fomentar o desenvolvimento e a implementação de projetos, permitindo o desenvolvimento tecnológico e reduzindo o horizonte de implementação;
- Buscar a formação de hubs, para que os esforços convirjam para o desenvolvimento do CCS, e não para a concorrência entre setores que possuem diversos níveis de maturidade tecnológica;
- Desenvolver mecanismos que garantam o retorno econômico dos projetos;
- Mitigar riscos políticos e regulatórios, através da criação de uma política que encontre alinhamento institucional e da construção de um arcabouço jurídico-regulatório que defina regras claras e diminua as incertezas para o investidor;
- Engajar a sociedade civil e promover educação e informação acerca dos projetos de CCS.

O desenvolvimento de projetos de CCS no país dependerá da adoção de uma política pública consistente, que limite os riscos para o investidor, mas, que ao mesmo tempo, esteja

alinhada com as ambições ambientais assumidas pelo Brasil por meio das NDC's. O CCS tende a ser um aliado, no curto e médio prazo, para o atingimento das metas de redução de emissões do país. Contudo, é necessário que se estruture uma política de forma mais pragmática possível. O CCS não pode ser visto como um novo mercado, mas sim como uma solução transitória para a neutralização das emissões.

Seguindo as lições de FREEMAN e PEREZ (1988), GEELS (2002) e MARKARD *et al.* (2012), uma transição sustentável só será possível através de uma desconstrução de regimes sociotécnicos existentes, que deve ser precedida pela definição de políticas públicas específicas e adequadas, que permitirão uma transição suave, buscando mitigar eventual crise em decorrência das alterações dos paradigmas precedentes. Neste sentido, o CCS pode ser um mecanismo importante na transformação deste sistema.

CONCLUSÃO

O aquecimento global e as mudanças climáticas são temas da mais alta importância nas discussões, sendo pauta constante em fóruns, convenções e nas agendas políticas internacionais e nacionais, como exaustivamente elucidado nesta pesquisa. O aquecimento global está intrinsecamente relacionado com o acúmulo de gases causadores do efeito estufa, que, por sua vez, possui relação íntima, mas não exclusiva, com o consumo energético dos países.

Assim sendo, a transição energética ganha contornos de destaque nesta discussão, pois, sem uma transição, não será possível alcançar as metas de redução de emissões assumidas pelos países por meio das NDC's. Por outro lado, uma troca a qualquer custo pode aumentar ainda mais as desigualdades entre as nações ou criar regimes de dependência, visto que haverá uma mudança na concentração de fontes de energia. O cenário atual, pautado fortemente no consumo de carvão, petróleo e gás natural, migrará para um modelo dependente de baterias, turbinas eólicas, painéis fotovoltaicos, biocombustíveis avançados e, provavelmente, novas tecnologias que sequer foram inventadas.

Esta pesquisa buscou avaliar os desafios em matéria de formulação de políticas públicas para o desenvolvimento de uma alternativa específica para o Brasil, qual seja, o CCS. O CCS, apesar de não ser uma tecnologia nova, vem emergindo nas discussões acerca da transição energética, se mostrando uma alternativa para que os países alcancem seus compromissos de redução de emissões de carbono e, simultaneamente, permitam a coexistência de uma matriz energética com forte presença de fósseis, viabilizando uma transição suave, preocupada com a manutenção da segurança energética, com o acesso à energia e com a sustentabilidade.

Para o Brasil, líder global na geração de energia por matrizes renováveis, mas que ainda é uma economia em desenvolvimento e dependente tecnologicamente de outras nações para aumentar seu portfólio de renováveis, o CCS possui relevância, uma vez que contribuirá com o abatimento das emissões de carbono, ao mesmo tempo que possibilitará a exploração das reservas de petróleo e gás natural. Ademais, o CCS emana como um complemento ao potencial nacional para produção de bioenergia, através do BECCS.

Em adição, os debates acerca do CCS também poderão beneficiar o desenvolvimento de projetos de CCUS no Brasil que, apesar de possuírem sinergias significativas, o primeiro se mostra mais simples, uma vez que se trata de uma armazenagem permanente, ao passo que o segundo envolve a armazenagem temporária e o aproveitamento do CO₂ para algum fim,

demandando a construção de uma política específica que estimule, regule, monitore e desenvolva esta atividade.

Durante o desenvolvimento desta pesquisa e ao longo dos quatro capítulos anteriores, certos objetivos foram perseguidos, definindo os limites da pesquisa e contribuindo para o melhor entendimento dos achados deste trabalho.

No capítulo dois, conceitos teóricos foram abordados. Buscou-se avaliar a importância de uma política pública, ou de um mix de políticas, no fomento a mudanças de regimes sociotécnicas. A relevância de um arcabouço regulatório também foi analisada. Esse capítulo também percorreu sobre as NDC's, conectando o CCS como uma alternativa para o cumprimento de tais metas e avaliando a capacitação tecnológica como um indutor para desenvolvimento de projetos deste tipo, evidenciando que o setor de óleo e gás possui maior aptidão para impulsionar o CCS.

Trazendo exemplos consolidados e comparando com o cenário nacional, o capítulo três avaliou os elementos por trás de políticas públicas tidas como bem-sucedidas. Com a análise dos casos de Sleipner, na Noruega, e do 45Q nos EUA, foi possível identificar os desafios e os caminhos que contribuíram para o sucesso, fazendo a conexão com os aportes conceituais abordados no capítulo anterior.

Através dessa análise, o capítulo quatro consolidou as lacunas existentes, extraindo potenciais aprendizados dos casos avaliados e sugerindo caminhos a serem seguidos no âmbito das políticas públicas para a transposição dos desafios relacionados ao desenvolvimento de projetos de CCS no Brasil.

Posto isso, cumpre lembrar que foram definidos um objetivo central e quatro objetivos específicos para esta pesquisa, cujas conclusões serão resumidas a seguir.

Quanto à existência de **um arcabouço jurídico regulatório**, restou claro que o Brasil carece de um instrumento que defina as premissas e diretrizes básicas para o desenvolvimento de projetos de CCS no país. Em que pese a existência de dois projetos de lei tramitando no Congresso Nacional, bem como o estabelecimento de um grupo de trabalho liderado pela ANP para o estudo do tema, a ausência de um conjunto formal de regras cria um cenário de insegurança e instabilidade jurídico-regulatória, diminuindo a credibilidade, aumentando riscos e afastando investimentos.

Além disso, foi possível evidenciar a **existência de projetos de CCS em desenvolvimento no país**. O projeto piloto desenvolvido na década de 1990 na Bacia do Recôncavo e o projeto de CCS na Bacia de Santos, ambos com foco na EOR, são os únicos dois projetos já implementados no Brasil, chamando a atenção para dois aspectos: (i) ambos foram

desenvolvidos pela Petrobras, empresa de economia mista com controle estatal; e (ii) ambos tiveram como foco a recuperação avançada de petróleo. Além desses, há quatro novos projetos anunciados, mas ainda não implementados, sendo que dois deles são, novamente, liderados pela Petrobras. Observou-se que a ausência de um arcabouço jurídico-regulatório, somada à concentração da capacitação tecnológica no setor de óleo e gás, contribuiu para a pequena quantidade de projetos no país e a concentração das iniciativas em uma empresa do setor de óleo e gás e de controle estatal.

A avaliação do contexto sociopolítico e aplicabilidade dos modelos estadunidense e norueguês no contexto nacional permitiu identificar a existência de três aspectos determinantes no sucesso desses dois modelos: (i) alinhamento político com o chefe de estado; (ii) existência de mecanismos que garantissem a atratividade financeira (p. ex.: incentivos fiscais ou taxação de carbono); e (iii) os interesses locais no desenvolvimento do CCS e relacionados com a manutenção do consumo de combustíveis fósseis. A presença destes três aspectos no desenvolvimento do primeiro projeto de CCS em larga escala no mundo e na política pública vista como a mais promissora para o desenvolvimento de CCS indicam que a distribuição de incentivos e/ou a taxação de carbono, aliadas com os interesses político e local, contribui para o fomento de projetos de CCS.

E como incentivar o CCS no Brasil? Como visto, sem uma política pública própria, as chances de surgimento espontâneo de projetos de CCS, sem a existência de regras e diretrizes, são poucas, limitando-se a projetos liderados pelo governo ou empresas diretamente relacionadas e para ações pontuais de publicidade de ações com foco no meio ambiente e redução de emissões.

As bases para a formulação de políticas públicas que poderão ser adotadas para estimular e desenvolver o CCS no Brasil deverão ser pautadas: (i) na definição da abrangência de atuação, ou seja, qual tipo de CCS será incentivado; (ii) no estabelecimento de regras e critérios claros e tangíveis (iii) na implementação de mecanismos que gerem atratividade econômica (iv) no alinhamento político; e (v) no engajamento da sociedade civil. Para que haja uma quebra do ciclo atual, permitindo a construção de um novo paradigma, é necessário que se construa uma política pública que dê segurança para investimentos, seja aderente aos anseios governamentais e aceita pela sociedade.

Através da análise dos quatro objetivos específicos ora elencados, foi possível **demonstrar a existência de uma lacuna na política pública nacional para o desenvolvimento de uma economia de baixo carbono e identificando os desafios para o desenvolvimento de uma política específica para o desenvolvimento de projetos**. Espera-se

que os pontos emanados nesta pesquisa possam contribuir para o desenho de uma política pública específica direcionada para desenvolvimento de projetos de CCS no Brasil.

REFERÊNCIAS

- ALSUNOISI, M.; KAYANASI, E. **The role of hydrogen in synthetic fuel production strategies**. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 54, p. 1169-1178, 2024.
- ANP. **Painel Dinâmico de Recursos e Reservas de Hidrocarbonetos**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/73ecarbo-dinamicos-da-anp/73ecarbo-dinamicos-sobre-exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/painel-dinamico-de-recursos-e-reservas-de-hidrocarbonetos>. Acesso em: 27 maio 2023.
- ARLOTA, C.; MEDEIROS COSTA, H. Who is taking climate change seriously? Evidence based on a comparative analysis of the carbon capture and storage national legal framework in Brazil, Canada, the European Union, and the United States. *In: ARLOTA, C.; MEDEIROS COSTA, H. (org). Carbon capture and storage in international energy policy and law*. Amsterdam: Elsevier, p. 234-246, 2021.
- ARAÚJO, I., MEDEIROS COSTA, H. Australian Legislation on new mitigation technologies – the case of carbon capture and storage. *In: ARLOTA, C.; MEDEIROS COSTA, H. (org). Carbon capture and storage in international energy policy and law*. Amsterdam: Elsevier, p. 167-179, 2021.
- ARAÚJO, I. *et al.* Regulatory framework carbon capture, utilization, and storage in Europe: a regulatory review and specific cases. *In: ARLOTA, C.; MEDEIROS COSTA, H. (org). Carbon capture and storage in international energy policy and law*. Amsterdam: Elsevier, p. 371-384, 2021.
- BALDWIN, R. Better Regulation: The Search and the Struggle. *In: BALDWIN, R.; CAVE, M.; LODGE, M. (org). The Oxford Handbook of Regulation*. Nova Iorque: Oxford University Press, 2010.
- BALDWIN, R.; CAVE, M.; LODGE, M. The Future of Regulation. *In: BALDWIN, R.; CAVE, M.; LODGE, M. (org). The Oxford Handbook of Regulation*. Nova Iorque: Oxford University Press, 2010.
- BALDWIN, R.; CAVE, M.; LODGE, M. **Understanding Regulation: Theory, Strategy, and Practice**. Nova Iorque: Oxford University Press, 2012.
- BERG, S. **Infrastructure Regulation: Risk, Return, and Performance**, *Global Utilities*, v. 1, p. 3-10, 2001.
- BECK, B. *et al.* **The current status of CCS development in Brazil**. *Energy Procedia*, v. 4, p. 6148-6151, 2011.
- BINENBOJM. G. **Agências Reguladoras Independentes e Democracia no Brasil**. Rio de Janeiro: R. Dir. Adm., 2005. P. 147-165.
- BIRKLAND, T. **An Introduction to the policy process: theories, concepts, and models of public policy making**. Nova Iorque: Routledge. 2020.
- BISOTTI, F. *et al.* **Direct air capture (DAC) deployment: National context cannot be neglected. A case study applied to Norway**. *Chemical Engineering Science*, v. 282, 2023.
- BRASIL. **Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC)**. 2023. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/73ecarboni-das-nacoes-unidas.html>. Acesso em: 22 maio 2023.

- BROECKS, K. *et al.* **Persuasiveness, importance and novelty of arguments about Carbon Capture and Storage.** *Environmental Science & Policy*, v. 59, p. 58-66, 2021.
- BRUNDTLAND, G. **The Politics of oil:** a view from Norway. *Energy Policy*, p. 102-109, 1988
- BUI, M. *et al.* **Carbon capture and storage (CCS):** The way forward. *Energy and Environmental Science*, v. 166, i. 5, p. 1062-1176, 2018.
- CABRAL, R. *et al.* **A synergistic approach for the simultaneous decarbonization of power and industry via bioenergy with carbon capture and storage (BECCS).** *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 87, p. 221-237, 2019.
- CCS BRASIL. **1º Relatório Anual de CCS no Brasil 2022/2023.** 2023
- CHANG, H.. **The economics and politics of regulation.** *Cambridge Journal of Economics*, v.21, p. 703-728, 1997.
- CRS. **The Section 45Q Tax Credit for Carbon Sequestration.** *In Focus*, v. 11455, 2023.
- CUELLAR-FRANCA, R., *et al.* Carbon Capture and Utilisation: Application of Life Cycle Thinking to Process. *In: International Symposium on Process Systems Engineering, 12, e European Symposium on Computer Aided Process Engineering., 25*, 2015, Copenhagen. Copenhagen: Elsevier, 2015. p. 1457-1462.
- CUNHA, B.; SECCHI, L. **Desafios da regulação na melhoria do estado:** presente e futuro. *Revista da CGU*, v. 13, n 24, p. 158-166, 2021.
- CUPERTINO, S. Relevant aspects of carbon storage activities' liability in paradigmatic countries: Australia, Brazil, Canada, European Union, Japan, Norway, United Kingdom, and United States. *In: ARLOTA, C.; MEDEIROS COSTA, H. (org). Carbon capture and storage in international energy policy and law.* Amsterdam: Elsevier, p. 315-334, 2021.
- DASSLER, T., **Combining theories of regulation:** Proposing a framework for analyzing regulatory systems worldwide. *Utilities Policy*, 2005.
- DESMOITIER, N. *et al.* **Methods for assessing social impacts of policies in relation to absolute boundaries.** *Environmental Impact Assessment Review*, v. 101, 2023.
- DINO, L.; GALLO, Y. **CCS Project in Recôncavo Basin.** *Energy Procedia*, v. 1, p. 2005-2011, 2009.
- DÜTSCHKE, E. *et al.* **Differences in the public perception of CCS in Germany depending on CO2 source, transport option and storage location.** *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 53, p. 149-159, 2016.
- EDMONDS, J. *et al.* **Could congressionally mandated incentives lead to deployment of large-scale CO2 capture, facilities for enhanced oil recovery CO2 markets and geologic CO2 storage?.** *Energy Policy*, v. 146, 2020.
- EIA. **What countries are the top producers and consumers of oil?.** 2023. Disponível em: <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=709&t=6>. Acesso em: 22 maio 2023.
- EIDE, L. *et al.* **Enabling large-scale carbon capture, utilisation, and storage (CCUS) using offshore carbon dioxide (CO2) infrastructure developments:** a review. *Energies*, v. 12, n. 1945, p. 1-21, 2019.
- EPE. **Balanco Energético Nacional:** relatório síntese. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados->

abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_S%C3%ADntese_2022_PT.pdf. Acesso em: 22 maio 2023.

EUA. **Nationally Determined Contribution: Reducing Greenhouse Gases in the United States: A 2030 Emissions Target.** 2021. Disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/United%20States%20NDC%20April%2021%202021%20Final.pdf>. Acesso em: 20 jan 2024.

EUA. **Building a clean energy economy: a guidebook to the inflation reduction act's investments in clean energy and climate action.** 2023. Disponível em: <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/12/Inflation-Reduction-Act-Guidebook.pdf>. Acesso em: 27 maio 2023.

FAN, J. *et al.* **Evaluating the effect of a subsidy policy on carbon capture and storage (CCS) investment decision-making in China: A perspective based on the 45Q tax credit.** *Energy Procedia*, v. 154, p. 22-28, 2018.

FAN, J. *et al.* **How can carbon capture utilization and storage be incentivized in China? a perspective based on the 45Q tax credit provisions.** *Energy Policy*, v. 132, p. 1229-1240, 2019.

FATTOUH, B. *et al.* **Capture Carbon, Capture Value: An Overview of CCS Business Models.** Oxford Institute for Energy Studies, 2024.

FREEMAN, C. **The Economics of Technical Change**, *Cambridge Journal of Economics*, v. 18, p. 463-514, 1994.

FREEMAN, C., PEREZ, C. Structural crisis of adjustment, business cycles and investment behaviour. In: DOSI, G. *et al.* (Org.). **Technical Change and Economic Theory**. London: Pinter, p. 38–66, 1988.

FREEMAN, M., YELLEN, D. **Capture that carbon.** *Scientific American*, v. 319, n. 2, p. 11, 2018.

GANTER, A., *et al.* **Near-term infrastructure rollout and investment strategies for net-zero hydrogen supply chains.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 194, p. 1-17, 2024.

GARBA, Z., GALADIMA, A. **Carbon Capture and Storage (CCS) Technology: Challenges to Implementation.** *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*, p. 291-299, 2020.

GEELS, F. **Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study.** *Research Policy*, v. 31, p. 1257–1274, 2002.

GEELS F. **A socio-technical analysis of low-carbon transitions: introducing the multi-level perspective into transport studies.** *Journal of Transport Geography*, v. 24, p. 471–482, 2012.

GIL, A. **Métodos e técnicas de pesquisa social.** São Paulo: Atlas. 1999.

GLOBAL CCS INSTITUTE. **The US Section 45Q Tax Credit for Carbon Oxide Sequestration: An Update.** 2020. Disponível em: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2020/04/45Q_Brief_in_template_LL.B.pdf. Acesso em: 06 jun 2023.

GODDARD, A. **Deal or No Deal: Will the US Inflation Reduction Act (IRA) push Carbon Capture and Storage (CCS) and Carbon Dioxide Removal (CDR) technologies over the line?.** Oxford Institute for Energy Studies, 2023.

GODOY, S., SAES, M. **Cap-and-trade e projetos de redução de emissões: comparativo entre mercados de carbono, evolução e desenvolvimento.** *Ambiente e Sociedade*, v XVIII, n. 1, p. 141-160, 2015.

GUNTHER, H. **Pesquisa qualitativa versus pesquisa quantitativa: esta é a questão?.** *Psicologia: Teoria e Pesquisa*, v. 22, n. 2, p. 201-211, 2006.

HASAN, M. *et al.* **Challenges and opportunities in carbon capture, utilization and storage: A process systems engineering perspective.** Computers & Chemical Engineering, v. 166, 2022.

HATIMONDI, S. *et al.* **Initiatives in Carbon Capture and Storage at PETROBRAS Research and Development Center.** Energy Procedia, v. 4, p. 6099-6103, 2011.

HAUG, J; STIGSON, P. **Local acceptance and communication as crucial elements for realizing CCS in the Nordic region.** Energy Procedia, v. 86, p. 315-323, 2016.

HELM, D. **The future of fossil fuels - is it the end?.** Oxford Review of Economic Policy, v. 32, n. 2, p. 191-205, 2016.

HELM, D. **COP26: So, was that it?.** Net Zero: How we stop causing climate change. 2021.

HELM, D., HEPBURN, C. **The age of electricity.** Oxford Review of Economic Policy, v. 35, n. 2, p. 183-196, 2019.

HEMMERSMANN, M., MULLER, T. **Green, Turquoise, Blue, or Grey?** Environmentally friendly Hydrogen Production in Transforming Energy Systems. Progress in Energy and Combustion Science. v. 90, 2022

HENRIKSEN, D.; OMBUDSTVEDT, I. **CCS – What does it takes?** Necessary framework to succeed with CCS. Energy Procedia. v. 63, p. 6730-6737, 2014.

HOLZ, F., *et al.* **A 2050 perspective on the role for carbon capture and storage in the European power system and industry sector.** Energy Econ. v. 104, 2021.

HU, Y.; WU, W. **Can fossil energy make a soft landing ?** — the carbon-neutral pathway in China accompanying CCS. Energy Policy, v. 174, 2023.

IBP. **Evolução da produção de biocombustíveis no mundo.** 2022. Disponível em: [https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/snapshots/evolucao-da-producao-de-biocombustiveis-no-mundo/#:~:text=A%20produ%C3%A7%C3%A3o%20global%20de%20biocombust%C3%ADveis,d%20\(26%2C4%25\)](https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/snapshots/evolucao-da-producao-de-biocombustiveis-no-mundo/#:~:text=A%20produ%C3%A7%C3%A3o%20global%20de%20biocombust%C3%ADveis,d%20(26%2C4%25).). Acesso em: 22 maio 2023.

IEA. **Energy technology perspectives: Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage - CCUS in clean energy transitions.** 2020.

IEA. **Net Zero by 2050: A Road Map for the global Energy Sector.** Disponível em: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>. 2021.

IEA. **Electricity Information: Overview.** Disponível em: <https://www.iea.org/reports/electricity-information-overview>. 2021.

IEA. **Energy technology perspectives.** 2023.

IEA. **Tracking Clean Energy Progress 2023.** 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023>. Acesso em: 03 abr 2024.

IRENA. **The Geopolitics of the Energy Transformation.** 2019.

IRENA. **Reaching zero with renewables: capturing carbon.** 2021.

KERN, F.; ROGGE, K.; HOWLETT, M. **Policy mixes for sustainable transitions: new approaches and insights through bridging innovation and policy studies.** Research Policy, v. 48, i. 10, 2019.

KRAFT, M; FURLONG, S. **Public policy: politics, analysis, and alternatives.** California, Sage. 2018.

- LINDBERG, M.; *et al.* **Policies, actors and sustainability transition pathways: A study of the EU's energy policy mix.** *Research Policy*, v. 48, i. 10, 2019.
- LIPPONEN, J; *et al.* **The politics of large-scale CCS deployment.** *Energy Procedia*, v. 114, p. 7581-7595, 2017.
- LÓPEZ, M.; RAZAUSKAS, A. **Espaço Económico Europeu (EEE), Suíça e região septentrional.** Disponível em: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/pt/sheet/169/the-european-economic-area-eea-switzerland-and-the-north>. Acesso em: 19 jan 2024.
- LORIA, P.; BRIGHT, M. **Lessons captured from 50 years of CCS projects.** *The Electricity Journal*, v. 34, p. 1-6, 2021.
- MA, J., *et al.* **Carbon Capture and Storage: History and the Road Ahead.** *Engineering*, v. 14, p. 33-43, 2022.
- MABON, L., LITTLECOTT, C. **Stakeholder and public perceptions of CO₂-EOR in the context of CCS – Results from UK focus groups and implications for policy.** *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 49, p. 128-137, 2016.
- MACHADO E SILVA, I. **Definições jurídicas estratégicas para estruturação do marco regulatório da cadeia de captura e armazenamento de carbono.** 2021. 278 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.
- MALERBA, F. **Sectoral systems of innovation and production.** *Research Policy*, v. 31, p. 247-264, 2002.
- MARKARD J. *et al.* **Sustainability transitions: An emerging field of research and its prospects.** *Research Policy*, v. 41, p. 955– 967, 2012.
- MAKITIE, T. *et al.* **The green flings: Norwegian oil and gas industry's engagement in offshore wind power.** *Energy Policy*, 127, p. 269-279, 2019.
- MARTÍNEZ, A. **Hype among low-carbon technologies: Carbon capture and storage in comparison.** *Global Environmental Change*, v. 41, p. 124-141, 2016.
- MARKUSSON, N. *et al.* **Assessing CCS viability: A socio-technical framework.** *Energy Procedia*, v. 4, p. 5744-5751, 2011.
- MEADOWCROFT, J.; LANGHELLE, O. The politics and policy of carbon capture and storage. *In: MEADOWCROFT, J.; LANGHELLE, O. (org). Catching the carbon: the politics and policy of carbon capture storage.* Massachusetts: Edward Elgar, p. 1-21, 2009.
- NAGABHUSHAN, D. *et al.* **Carbon capture: Prospects and policy agenda for CO₂-neutral power generation.** *The Electricity Journal*, v. 34, i. 7, p. 1-13, 2021.
- NETTO, A. *et al.* **A first look at social factors driving CCS perception in Brazil: A case study in the Recôncavo Basin.** *International Journal of Greenhouse Gas Control*, p. 1-11, 2020.
- NEVES, J. **Pesquisa Qualitativa: Características, Usos e Possibilidades.** São Paulo: Caderno de Pesquisas em Administração, vol. 1, 1996.
- NOGUEIRA, L. *et al.* **Will thermal power plants with CCS play a role in Brazil's future electric power generation?.** *International Journal of Greenhouse Gas Control*, p. 115-123, 2014.
- NOGUEIRA, T. *et al.* **Evaluation of offshore CO₂ transport alternatives in Brazil.** *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 116, 2022.

- PEREIRA SILVA, Y.; MEDEIROS COSTA, H. Why is social acceptance important for capture, storage, and transport of carbon (CCS) projects?. *In: ARLOTA, C.; MEDEIROS COSTA, H. (org). Carbon capture and storage in international energy policy and law*. Amsterdam: Elsevier, p. 371-384, 2021.
- POLLAK, M. *et al.* **The geography of CCS regulatory development in the US**. *Energy Procedia*, v. 1, p. 4543-4550, 2009.
- RIMMER, M. Carbon capture and storage: Intellectual property, innovation policy and climate change. *In: ARLOTA, C.; MEDEIROS COSTA, H. (org). Carbon capture and storage in international energy policy and law*. Amsterdam: Elsevier, p. 181-203, 2021.
- RINGROSE, P. **The CCS hub in Norway**: some insights from 22 years of saline aquifer storage. *Energy Procedia*, v. 146, p. 166-172, 2018.
- RÓMAN, M.; SCHOTT, F. **Sleipner and Pre-Salt**: the competitive strategic concerns of promoting CCS in Norway and Brazil. *Energy Procedia*, v. 4, p. 5421-5728, 2011.
- RUEDA, L. **Investigación y evaluación cualitativa**: bases teóricas y conceptuales. *Atención Primaria*, v. 23, n.8, p. 108-122, 1999.
- SCHILING, M. **Strategic management of technological innovation**. 6ed. New York: McGraw-Hill Education, 2019.
- SCHIPPERS, E. **Addressing climate change with carbon dioxide removal**: Insights from industrial economics and cooperative games. 2022. 259 f. Tese (Doutorado) – Université Paris-Saclay, Paris, 2022.
- SCHOT, J.; STEINMUELLER, W. **Three frames for innovation policy**: R&D, systems of innovation and transformative change. *Research Policy*. v.47, p.1554–1567, 2018.
- SCHYMURA, L. **Petróleo deve elevar fortemente arrecadação até 2030, mas é preciso evitar mau uso dessa receita**. *Conjuntura Econômica*, p. 6-9, 2022.
- SENGUL, M. CO₂ sequestration-a safe transition technology. *Apud: KALAM, S. et al. Carbon dioxide sequestration in underground formations*: review of experimental, modeling, and field studies. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2020.
- SHU, Y. *et al.* **The role of carbon capture and storage to achieve net-zero energy systems**: Trade-offs between economics and the environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 178, 2023.
- SILVA, D. *et al.* **Recuperação avançada de petróleo associada à captura e armazenamento de carbono**. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 1, 2022.
- STERN, J. *et al.* **Norwegian gas exports**: Past policy, current prospects and future options. *Energy Policy*, p. 55-60, 1990.
- TARUFELLI, B. *et al.* **The potential impact of the U.S. carbon capture and storage tax credit expansion on the economic feasibility of industrial carbon capture and storage**. *Energy Policy*, v. 149, 2021.
- TIDD, J.; BESSANT, J. **Managing Innovation**: integrating technological, market and organizational change. 4ed. Hoboken: Wiley, 2009.
- TILSTED, J. *et al.* **Petrochemical transition narratives**: Selling fossil fuel solutions in a decarbonizing world. *Energy Research & Social Science*, 2022.

TJERNSHAUGEN, A.; LANGHELLE, O. Technology as a political glue: CCS in Norway. *In*: MEADOWCROFT, J.; LANGHELLE, O. (org). **Caching the carbon**: the politics and policy of carbon capture storage. Massachussets: Edward Elgar, p. 98-124, 2009.

TORVANGER, A.; MEADOWCROFT, J. **The political economy of technology support**: Making decisions about carbon capture and storage and low carbon energy technologies. *Global Environmental Change*, v. 21, p. 303-312, 2011.

UNFCCC. **Paris Agreement**. 2015. Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf. Acesso em: 22 maio 2023.

UNFCCC. **Kyoto Protocol**. 1998. Disponível em: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>. Acesso em: 22 maio 2023.

VAN GESTEL, R.; HERTOOGH, M. **What is regulatory pressure?** An exploratory study of the international literature. Tilburg: Scientific Research and Documentation Centre, Dutch Ministry of Justice. 2006.

VELJANOVSKI, C. Economic Approaches to Regulation. *In*: BALDWIN, R.; CAVE, M.; LODGE, M. (org). **The Oxford Handbook of Regulation**. Oxford University Press, 2010

VÖGELE, S. **Germany's "No" to carbon capture and storage**. *Appl. Energy* v. 214, p. 205–218, 2018

WAXMAN, A. *et al.* **Leveraging scale economies and policy incentives**: Carbon capture, utilization & storage in Gulf clusters. *Energy Policy*, v. 156, 2021.

WEIMER, D.; VINING, A. **Policy analysis**: concepts and practice. Nova Iorque: Routledge. 2017.

ZAKKOUR, P. *et al.* **The Role of UNFCCC Mechanisms in Demonstration and Deployment of CCS Technologies**. *Energy Procedia*, v. 63, p. 6945-6958, 2014.