



UMA TRANSIÇÃO JUSTA PARA A INDÚSTRIA DO CARVÃO: PROPOSTAS DE
SISTEMAS INOVADORES DE REMOÇÃO DE CO₂ DA ATMOSFERA E UM
ESTUDO DE CASO PARA O BRASIL

Fábio Teixeira Ferreira da Silva

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Planejamento Energético.

Orientadores: Roberto Schaeffer

Alexandre Salem Szklo

Rio de Janeiro
Novembro de 2023

UMA TRANSIÇÃO JUSTA PARA A INDÚSTRIA DO CARVÃO: PROPOSTAS DE
SISTEMAS INOVADORES DE REMOÇÃO DE CO₂ DA ATMOSFERA E UM
ESTUDO DE CASO PARA O BRASIL

Fábio Teixeira Ferreira da Silva

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Orientadores: Roberto Schaeffer

Alexandre Salem Szklo

Aprovada por: Prof. Roberto Schaeffer

Prof. Alexandre Szklo

Prof. Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Prof^a. Bettina Susanne Hoffmann

Prof. Thiago Fernandes de Aquino

Prof. Arnaldo Cesar da Silva Walter

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

NOVEMBRO DE 2023

da Silva, Fábio Teixeira Ferreira

Uma transição justa para a indústria do carvão: propostas de sistemas inovadores de remoção de CO₂ da atmosfera e um estudo de caso para o Brasil/ Fábio Teixeira Ferreira da Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2023.

XVII, 263 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Roberto Schaeffer

Alexandre Salem Szklo

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2023.

Referências Bibliográficas: p. 167-213.

1. Transição Energética. 2. Transição Justa. 3. Carvão Mineral. 4. Mudança Climática. I. Schaeffer, Roberto. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

Glück auf!

AGRADECIMENTOS

A meus orientadores, Roberto Schaeffer e Alexandre Szklo, por todo ensinamento, apoio e atenção a mim dedicados ao longo de minha trajetória desde o mestrado, sempre com muita clareza, escuta ativa e um trato humano. Sua confiança certamente foi um dos mais importantes suportes que tive para superar os desafios desse período, que incluíram nada menos que uma pandemia. Estendo esses agradecimentos a meu orientador honorífico, Pedro Rochedo.

À prof. Susanne Hoffmann, ao prof. Thiago Aquino e ao prof. Arnaldo Walter, por terem aceitado o convite para participar da banca de avaliação da minha tese.

Aos colegas da ABCM, na figura de Luiz Fernando Zancan, e da SATC, na figura de Thiago Aquino, por apoiarem, incentivarem e acreditarem no estudo desde o princípio.

Ao corpo docente do PPE, pela formação acadêmica de excelência e multidisciplinar nessa área fascinante que é o Planejamento Energético. Agradeço em particular aos professores André Lucena, Joana Portugal-Pereira, David Branco, Amaro Pereira, Maurício Tolmasquim e Luiz Pinguelli Rosa (*in memoriam*). Agradeço também aos funcionários do PPE por todo o suporte e presteza nos momentos de necessidade. Minha gratidão a Sandrinha, Queila, Fernando, Paulo e Josilene.

Aos fundamentais colegas de Cenergia, que dividiram comigo muitos trabalhos, desafios, almoços, cafés e risadas nesses últimos anos. Correndo o risco de ser injusto, muito obrigado Alberto, Aline, Amanda, Ana, Bernardo, Bruno, Camila, Camilla, Camilo, Cindy, Clarissa, Eduardo, Eveline, Fabio, Fernanda, Frans, Gabi, Gerd, Huang, Isabela, Mariana, Marianne, Matheus, Paula, Pedro, Rafael, Rebecca, Régis, Taísa, Talita *et al.* (perdão aos eventualmente não citados nominalmente, é muita gente boa). Agradeço especialmente aos amigos Dudu, Gerd e LB pelas longas resenhas e pelos necessários empurrões nessa conturbada reta final de tese e à minha amiga Fran, pela companhia desde o princípio dessa jornada.

A meus pais, Sonilda e Henrique, e a meu irmão, Felipe, por serem minha base, acreditarem em mim e sempre estarem dispostos a me ouvir ou a tolerar o meu silêncio nos momentos necessários. Também à Pepita, pela companhia infalível a todo tempo.

À minha doce Danúbia, por seu apoio, dedicação, carinho e compreensão nesses últimos anos. O destino reservou que nosso encontro ocorresse quando nós dois enfrentamos o doutorado, para que pudéssemos nos apoiar mutuamente e concluirmos quase literalmente juntos, com apenas um dia de diferença na defesa. Sua presença tem sido muito importante para a conclusão dessa etapa. Estendo esse agradecimento também a sua família, pelo acolhimento e carinho.

A todos os meus bons e velhos amigos e familiares, que compreenderam a minha ausência e agora festejarão comigo!

À Associação Brasileira do Carvão Mineral e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior pelo suporte financeiro na forma de bolsa de estudo.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

UMA TRANSIÇÃO JUSTA PARA A INDÚSTRIA DO CARVÃO: PROPOSTAS DE SISTEMAS INOVADORES DE REMOÇÃO DE CO₂ DA ATMOSFERA E UM ESTUDO DE CASO PARA O BRASIL

Fábio Teixeira Ferreira da Silva

Novembro/2023

Orientadores: Roberto Schaeffer

Alexandre Salem Szklo

Programa: Planejamento Energético

A urgência da crise climática requer uma transição profunda para a descarbonização do setor energético, abrangendo a redução do uso de combustíveis fósseis e o desenvolvimento de tecnologias de remoção de CO₂ da atmosfera. No entanto, essa transição pode impactar regiões dependentes de recursos fósseis, como o carvão mineral, ressaltando a importância de uma transição justa, ou seja, que não deixe ninguém para trás no processo. No arcabouço da transição justa, as medidas transformadoras de longo prazo muitas vezes têm foco no desenvolvimento de setores alternativos, negligenciando possibilidades de a indústria do carvão contribuir com a descarbonização. Nesse sentido, a tese propõe três arranjos inovadores para a indústria do carvão com potencial de remover CO₂ da atmosfera: a produção de zeólitas a partir de cinzas de carvão para captura de CO₂ em usinas de biomassa, a mineração reversa de carbono e o coaproveitamento abatido. Para o primeiro, é feito um estudo de caso para Santa Catarina, Brasil, apontando que as cinzas de uma termelétrica de 330 MW com o carvão local pode produzir até 500 kt de zeólitas, representando um potencial de faturamento anual superior a US\$ 2 bilhões e a remoção de até 109 Mt/ano de CO₂ da atmosfera, se direcionadas à captura de CO₂ em termelétricas a biomassa. Em resumo, a pesquisa sugere que a indústria do carvão pode contribuir para a descarbonização se redefinir sua missão e valores, tornando-se um agente de transformação em direção a uma economia neutra em emissões de gases de efeito estufa.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

A JUST TRANSITION FOR THE COAL INDUSTRY: PROPOSALS OF
INNOVATIVE CARBON DIOXIDE REMOVAL SYSTEMS AND A CASE STUDY
FOR BRAZIL

Fábio Teixeira Ferreira da Silva

November/2023

Advisors: Roberto Schaeffer
Alexandre Szklo

Department: Energy Planning

The urgency of the climate crisis demands a profound transition in the energy sector towards decarbonization, encompassing the reduction of fossil fuel use and the development of carbon dioxide removal technologies from the atmosphere. However, this transition can impact fossil resources dependent regions, such as coal mining states. This highlights the significance of a just transition, which commits to ensuring that no one is left behind in the process. Within the framework of a just transition, transformative long-term measures often focus on the development of alternative sectors, overlooking possibilities for the coal industry to contribute to decarbonization. In this context, the thesis proposes three innovative arrangements for the coal industry with the potential to remove CO₂ from the atmosphere: the production of zeolites from coal ash for CO₂ capture in biomass power plants, reverse carbon mining, and abated co-processing. For the first arrangement, a case study is conducted for Santa Catarina, Brazil, indicating that the ashes from a 330 MW coal-fired power plant using local coal could produce up to 500 kt of zeolites, representing a potential annual revenue exceeding \$2 billion and the removal of up to 109 Mt/year of CO₂ from the atmosphere if the zeolites are directed toward CO₂ capture in biomass power plants. In summary, the research suggests that the coal industry can contribute to decarbonization by redefining its mission and values, becoming an agent of transformation towards a greenhouse gas-neutral economy.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2	PERGUNTA DE PESQUISA, FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E OBJETIVOS	4
1.2.1	Pergunta de pesquisa e formulação do problema	4
1.2.2	Objetivos	4
1.3	ESTRUTURA DA TESE	5
2	O CARVÃO MINERAL E A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA JUSTA	6
2.1	O CARVÃO NO DESENVOLVIMENTO DAS SOCIEDADES MODERNAS	6
2.2	TRANSIÇÕES ENERGÉTICAS OBSERVADAS NO SÉCULO XX	9
2.3	OS REGIMES SOCIOTÉCNICOS	12
2.3.1	O ponto de vista do regime incumbente	16
2.4	A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA DO SÉCULO XXI	19
2.4.1	Emissões negativas na transição energética do século XXI	24
2.4.2	Transição justa para a indústria do carvão mineral	34
3	A INDÚSTRIA CARBONÍFERA NO BRASIL	46
3.1	CARACTERÍSTICAS DO SETOR ENERGÉTICO BRASILEIRO	46
3.2	O CARVÃO MINERAL NO BRASIL	51
3.3	A PERSPECTIVA DA INDÚSTRIA DO CARVÃO NO BRASIL PARA A TRANSIÇÃO JUSTA	55
4	PROPOSTAS DE SISTEMAS NÃO-CONVENCIONAIS PARA REMOÇÃO DE CO₂ DA ATMOSFERA POR MEIO DA INDÚSTRIA CARBONÍFERA	60
4.1	PRODUÇÃO DE ZEÓLITAS DE CINZAS DE CARVÃO MINERAL PARA CAPTURA DE CO ₂ COM EMISSÕES NEGATIVAS EM TERMELÉTRICAS A BIOMASSA	63
4.1.1	Revisão da literatura	63
4.1.2	Proposta de sistema	76
4.2	OUTROS SISTEMAS PROPOSTOS	79
4.2.1	Uso do espaço e da infraestrutura de minas de carvão deplecionadas para estocagem permanente de carbono na forma de biochar	79
4.2.2	Captura de CO ₂ associada ao coaproveitamento de biomassa e carvão para descarbonização do cimento	83
5	ESTUDO DE CASO: ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE ZEÓLITAS DE CINZAS DE CARVÃO MINERAL PARA CAPTURA DE CO₂ COM EMISSÕES NEGATIVAS EM TERMELÉTRICAS A BIOMASSA NO ESTADO DE SANTA CATARINA	88
5.1	METODOLOGIA	88
5.1.1	Simulação de UTE a carvão mineral e a biomassa	89
5.1.2	Simulação do processo de produção de zeólitas a partir de cinzas de carvão mineral	101
5.1.3	Análise técnico-econômica dos sistemas	104
5.1.4	Análise de barreiras e de cobenefícios	110
5.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES	113
5.2.1	Simulações da planta termelétrica a carvão mineral e potencial de produção de zeólitas de cinzas	113
5.2.2	Simulação da captura de CO ₂ em usinas termelétricas a biomassa	116
5.2.3	Análise técnico-econômica do sistema	121

5.2.4	Análise de barreiras e cobenefícios	136
5.2.5	Implicações para a transição justa e propostas de políticas públicas para implementação do sistema	155
6	CONCLUSÃO	160
6.1	PRINCIPAIS LIÇÕES	160
6.2	LIMITAÇÕES.....	164
6.3	RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	165
	REFERÊNCIAS	168
	APÊNDICE A – DETALHAMENTO DE CUSTOS DA ANÁLISE TÉCNICO- ECONÔMICA	215
A1:	USINA TERMELÉTRICA A CARVÃO MINERAL	215
	Caso Sem CCS	215
	Caso CCS TSA.....	216
	Caso CCS TSA otm	217
	Caso CCS ABS	218
A2:	USINA TERMELÉTRICA A BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR	219
	Caso Sem CCS	219
	Caso CCS TSA.....	220
	Caso CCS TSA otm	221
	Caso CCS ABS	222
A3:	USINA TERMELÉTRICA A RESÍDUO DE EUCALIPTO.....	223
	Caso Sem CCS	223
	Caso CCS TSA.....	224
	Caso CCS TSA otm	225
	Caso CCS ABS	226
	APÊNDICE B: ASPECTOS TÉCNICOS E AMBIENTAIS DO CARVÃO MINERAL.....	227
B1:	CARVÃO MINERAL E OS RECURSOS FÓSSEIS	227
B2:	LAVRA E BENEFICIAMENTO DO CARVÃO MINERAL	230
	Mineração a céu aberto	230
	Mineração subterrânea	231
	Beneficiamento do minério de carvão.....	233
B3:	CONVERSÃO TERMELÉTRICA DO CARVÃO MINERAL	236
	Combustão de carvão pulverizado (PCC)	237
	Combustão em leito fluidizado	238
	Gasificação integrada com ciclo combinado.....	239
B4:	QUEIMA DO CARVÃO MINERAL E POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA	241
	Material particulado: o problema da fumaça.....	241
	Óxidos de enxofre e nitrogênio: o problema da chuva ácida	247
	Poluição climática: o problema do aquecimento global.....	252

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1. Evolução do consumo global de energia primária por fonte	10
Figura 2-2. Evolução histórica da estrutura do consumo global de energia primária	11
Figura 2-3. Hierarquia conforme a perspectiva sociotécnica multinível.....	14
Figura 2-4. Evolução da participação das fontes de energia primária na geração elétrica no Reino Unido entre 1920 e 2020	18
Figura 2-5. Evolução temporal do consumo de carvão mineral no mundo em base energética.....	21
Figura 2-6. Esquematização de algumas das principais NETs e suas atuações sobre o ciclo do carbono para fornecimento de RCA.	25
Figura 2-7. Evolução histórica do Dia de Sobrecarga da Terra.....	35
Figura 2-8. Zeche Zollverein, um símbolo da transição energética justa na região do Ruhr, Alemanha.....	45
Figura 3-1. Série histórica do número de trabalhadores formais nos setores de mineração e beneficiamento do carvão mineral no sul do Brasil.....	55
Figura 4-1: Estrutura de zeólitas com arranjo poliédrico – (a) A; (b) X ou Y	65
Figura 4-2. Participação de cada tipo de uso final no valor do mercado das zeólitas	70
Figura 4-3. Proposta de sistema para remoção de CO ₂ da atmosfera a partir de zeólitas produzidas de cinzas de carvão mineral	77
Figura 4-4. Esquematização do sistema proposto de mineração reversa de carbono.....	81
Figura 4-5. Esquematização qualitativa da pegada de carbono em função da composição da mistura cimentícia na forma de um diagrama ternário	86
Figura 5-1. Fluxograma metodológico da modelagem e análise do sistema proposto de emissões negativas a partir de zeólitas de cinzas de carvão mineral.....	88
Figura 5-2. Diagrama do processo de geração termelétrica a carvão mineral.....	91
Figura 5-3. Esquema do processo considerado para a captura de CO ₂ pós-combustão com adsorventes sólidos	96
Figura 5-4. Fluxograma esquemático do processo de síntese das zeólitas X.....	101

Figura 5-5. Custos e receita da produção de zeólitas a partir de cinzas em função do nível de produção	130
Figura 5-6. Variação do preço mínimo de venda da eletricidade pelas termelétricas a biomassa em função do preço pago pelo serviço de RCA	134
Figura 5-7. Variação do preço mínimo de venda do serviço de RCA em função do preço pago pela eletricidade	134
Figura B-1. Esquematização do processo de mineração a céu aberto	231
Figura B-2. Esquematização da mineração subterrânea pelo método de câmara e pilares	232
Figura B-3. Esquematização da mineração subterrânea pelo método de frente larga..	233
Figura B-4. Fluxograma esquemático do processo IGCC.....	240
Figura B-5. Esquematização representativa do uso de combustíveis fósseis sobre o ciclo do carbono	255

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Modelo de fases para desestabilização de um regime incumbente.....	17
Tabela 2.2. Consumo de carvão mineral, em base energética, nos principais centros do mundo	21
Tabela 3.1. Perfil setorial das emissões de GEE do Brasil em 2020, em toneladas de GEE	50
Tabela 3.2. Empresas e número de minas de carvão em operação no Brasil	53
Tabela 3.3. Usinas termelétricas a carvão mineral em operação no Brasil em 2023	54
Tabela 5.1. Configuração da planta termelétrica a carvão mineral considerada para o sistema proposto	91
Tabela 5.2. Parâmetros físico-químicos considerados para o carvão mineral.....	92
Tabela 5.3. Parâmetros considerados para as cinzas do carvão mineral	93
Tabela 5.4. Parâmetros-chave para simulação da planta termelétrica a carvão mineral com captura de CO ₂	94
Tabela 5.5. Descrição dos casos de simulação das usinas termelétricas no IECM.....	97
Tabela 5.6. Parâmetros físico-químicos considerados para as biomassas avaliadas	99
Tabela 5.7. Parâmetros considerados para as cinzas dos tipos de biomassa avaliados ..	99
Tabela 5.8. Parâmetros-chave para simulação das plantas de BECCS	100
Tabela 5.9. Parâmetros técnicos assumidos para a operação da planta de produção de zeólitas em escala piloto	102
Tabela 5.10. Equipamentos industriais requeridos em cada etapa da produção de zeólitas	103
Tabela 5.11. Demandas específicas de insumos para a produção de zeólitas X	103
Tabela 5.12. Parâmetros econômicos auxiliares à modelagem	104
Tabela 5.13. Níveis de contingência de processo recomendados para o status da tecnologia empregada.....	106
Tabela 5.14. Valores heurísticos para dimensionamento de equipe industrial.....	107

Tabela 5.15. Parâmetros utilizados para estimativa dos custos de operação e manutenção fixos	108
Tabela 5.16. Preços padronizados para utilidades e matérias-primas nas simulações .	109
Tabela 5.17. Definições das classes de barreiras.....	111
Tabela 5.18. Parâmetros técnicos obtidos dos casos simulados da planta termelétrica a carvão mineral	113
Tabela 5.19. Parâmetros técnicos obtidos dos casos simulados da planta termelétrica a bagaço de cana-de-açúcar.....	116
Tabela 5.20. Parâmetros técnicos obtidos dos casos simulados da planta termelétrica a resíduos de eucalipto	117
Tabela 5.21. Componentes de custo do processo de produção de zeólitas	121
Tabela 5.22. Componentes de custo dos casos simulados para a usina termelétrica a carvão mineral	124
Tabela 5.23. Componentes de custo dos casos simulados para a usina termelétrica a bagaço de cana-de-açúcar.....	125
Tabela 5.24. Componentes de custo dos casos simulados para a usina termelétrica a resíduos de eucalipto	126
Tabela 5.25. Avaliação das necessidades de produção de zeólitas X para cobrir os custos da termelétrica a carvão.....	129
Tabela 5.26. Impacto do preço das zeólitas na necessidade de atendimento de termelétricas a biomassa e no custo do BECCS	132
Tabela 5.27. Principais barreiras identificadas para o sistema de captura de CO ₂ com zeólitas de cinzas de carvão mineral para a obtenção de emissões negativas	141
Tabela 5.28. Cobenefícios do sistema proposto de produção de zeólitas a partir de cinzas de carvão mineral para captura de CO ₂	152
Tabela B.1. Classificação do carvão mineral conforme o rank.....	228
Tabela B.2. Tipos de plantas termelétricas a carvão mineral	237
Tabela B.3. Fatores de equivalência dos principais GEE pela métrica GWP-100/AR-6	254

Lista de Siglas e Acrônimos

%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
ABIQUIM	Associação Brasileira da Indústria Química
AFOLU	<i>Agriculture, Forestry and Other Land-Use</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANM	Agência Nacional de Mineração
AR 6	<i>IPCC Sixth Assessment Report</i>
BECCS	<i>Bioenergy with Carbon Capture and Storage</i>
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
CBIO	Crédito de descarbonização
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CCS	<i>CO₂ Capture and Storage</i>
CCU	<i>CO₂ Capture and Utilization</i>
CCUS	<i>CO₂ Capture, Utilization and Storage</i>
CDE	Conta de Desenvolvimento Energético
CEPCI	<i>Chemical Engineering Plant Cost Index</i>
CFEM	Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₂ eq	Dióxido de carbono equivalente
DAC	<i>Direct Air Capture</i>
DIEESE	Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos
EJ	Exajoule
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ESA	<i>Electric Swing Adsorption</i>
ESP	<i>Electrostatic Precipitator</i>
EUA	Estados Unidos da América
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FCC	<i>Fluid Catalytic Cracking</i>
FCCSA	Fábrica Carioca de Catalisadores S.A.
FGD	<i>Flue Gas Desulfurization</i>

GCCSI	<i>Global CCS Initiative</i>
GEE	Gases de efeito estufa
Gt	Giga tonelada
GWP	Global Warming Potential
IAM	<i>Integrated Assessment Model</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IECM	<i>Integrated Environmental Control Model</i>
IEMA	Instituto de Energia e Meio Ambiente
ILO	<i>International Labour Organization</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
kg	Quilograma
m ³	Metro cúbico
MCTI	Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação
MDIC	Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços
MEA	Monoetanolamina
MLP	Multi-Level Perspective
Mt	Milhões de toneladas
MW	Megawatt
N ₂ O	Óxido nitroso
NDC	<i>Nationally determined contributions</i>
NET	<i>Negative Emissions Technology</i>
NETL	<i>National Energy Technology Laboratory</i>
NIMBY	<i>Not In My Backyard</i>
O&M	Operação e manutenção
OCDE	Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico
ODM	Objetivo de Desenvolvimento do Milênio
ODS	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
ONS	Operador Nacional do Sistema
ONU	Organização das Nações Unidas
OPEX	<i>Operational Expense</i>
pH	Potencial hidrogeniônico
PIB	Produto interno bruto
PLD	Preço de Liquidação das Diferenças

ppm	Partes por milhão
PRADSUL/SC	Programa de Recuperação Ambiental de Áreas Degradadas do Polo de Transição Energética Justa do Sul do Estado de Santa Catarina
PROSUL/SC	Programa de Transição Sustentável da Cadeia Produtiva do Carvão Mineral Sul de Santa Catarina
PSA	<i>Pressure Swing Adsorption</i>
R\$	Real brasileiro
RCA	Remoção de carbono da atmosfera
ROM	<i>Run-of-mine</i>
SATC	Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
SCR	<i>Selective Catalytic Reduction</i>
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
SIECESC	Sindicato da Indústria de Extração de Carvão do Estado de Santa Catarina
SIN	Sistema Interligado Nacional
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
SR 1.5	<i>IPCC Special Report on Global warming of 1.5°C</i>
t	Tonelada
tep	Tonelada equivalente de petróleo
TNA	<i>Technology Needs Assessment</i>
TRL	<i>Technology Readiness Level</i>
TSA	<i>Temperature Swing Adsorption</i>
TWh	Terawatt-hora
UNEP	United Nations Environment Programme
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
US\$	Dólar americano
USGAO	<i>United States Government Accountability Office</i>
USGS	<i>United States Geological Service</i>
UTE	Usina termelétrica
UTEJLC	Unidade C do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda
VSA	<i>Vacuum Swing Adsorption</i>
VTSA	<i>Vacuum and Temperature Swing Adsorption</i>
WG1	<i>IPCC's Working Group 1</i>
WWF	<i>World Wide Fund for Nature</i>

1 Introdução

1.1 Contextualização

As mudanças climáticas impõem desafios críticos para a humanidade. A evidência da influência humana sobre o desequilíbrio do clima é inequívoca (IPCC, 2021). Ademais, reúnem-se cada vez mais evidências de impactos das mudanças do clima sobre o sistema terrestre, medidos em perda de biodiversidade nos ecossistemas, prejuízos econômicos e perda de vidas humanas (ABBASS *et al.*, 2022; BERRANG-FORD *et al.*, 2021). Nesse sentido, parte do desafio do século XXI está na adaptação dos sistemas humanos a uma nova e pouco previsível conjuntura mais extrema do clima, aumentando a resiliência desses contra eventos climáticos extremos e condições crônicas menos favoráveis de vida (IPCC, 2022b). A outra parte está em interromper o quanto antes as fontes dos desequilíbrios climáticos causados pelos seres humanos, que são as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) que se acumulam na atmosfera (IPCC, 2022a).

Tomando como referência os recortes setoriais das emissões antrópicas de GEE, verifica-se que parte substantiva do desafio de cessar a fonte do desequilíbrio climático está associada ao controle do CO₂ emitido pela queima não abatida de combustíveis fósseis. Essas são responsáveis por cerca de 64% do total de emissões de GEE provenientes das atividades humanas (IPCC, 2022a). Logo, a descarbonização da economia passa invariavelmente por uma ação global sobre o uso dos combustíveis fósseis, que deverão abrir cada vez mais espaço para as fontes renováveis de energia. Além disso, deve-se buscar esforços para remover o carbono da atmosfera de forma a compensar emissões residuais que continuarão a ser emitidas pelos seres humanos (IPCC, 2022a).

Isso requer mudanças profundas na forma como os seres humanos incorporam os recursos de energia da natureza nos processos das sociedades modernas. Esse conjunto de mudanças configura um fenômeno social e tecnológico, ao qual se convencionou a denominação de transição energética (KANGER *et al.*, 2019). E essa não seria a primeira das grandes transições energéticas: a História mostra que, no século XIX, o homem trocou a lenha pelo carvão mineral e, no século XX, trocou o

carvão mineral pelo petróleo como a principal fonte de energia primária para abastecer suas demandas (GRUBLER *et al.*, 2012).

Não obstante, a transição energética do século XXI apresenta peculiaridades em relação às grandes transições vistas no passado. Primeiramente, trata-se de um fenômeno que, diferentemente das anteriores, não ocorrerá guiado pelo aproveitamento das vantagens comparativas das fontes e conversores substitutos (FOUQUET; PEARSON, 2012; SZKLO; SCHAEFFER, 2006). Com isso, requerer-se-á um alto grau de planejamento e coesão entre as ações de todas as partes. Outrossim, as transições pretéritas poderiam ser mais bem classificadas como “adições energéticas”, uma vez que representaram a troca da fonte principal incumbente não pela queda no seu uso, mas pelo crescimento da nova fonte a um patamar superior (YORK; BELL, 2019). Assim sendo, pode-se dizer que a transição do século XXI inclui um propósito inédito de redução absoluta do uso de combustíveis fósseis de forma planejada e, portanto, deliberada (SOVACOOOL; GEELS, 2016).

Por um lado, a descarbonização abre um amplo espaço para o desenvolvimento de novas indústrias associadas ao aproveitamento de recursos renováveis de energia, o que tem grande potencial de geração novos negócios, emprego e renda. Por outro lado, cria uma potencial *casta* de perdedores, sobretudo em regiões que apresentam alto nível de dependência socioeconômica de indústrias fósseis. Isso cria desafios à descarbonização, no sentido de sua legitimidade ou mesmo viabilidade social (SPENCER *et al.*, 2018).

Entra em questão o conceito de “transição justa”, enquanto um conceito para transição energética que não “deixa ninguém para trás” (ILO, 2015). Assim, a proposta de uma transição justa contempla mapear indivíduos, empresas e regiões impactadas negativamente por ações para a descarbonização, proporcionando meios para que os afetados possam subsistir e encontrar novas formas de se integrar à economia de baixo carbono (GAMBHIR; GREEN; PEARSON, 2018).

No cerne da transição justa está a indústria do carvão mineral, que dos combustíveis fósseis é o mais ameaçado pela descarbonização (MCGLADE; EKINS, 2015). Atualmente, o principal emprego para o carvão mineral é para a

geração elétrica, na qual ele vem continuamente perdendo espaço para fontes de energia renovável e mesmo para o gás natural, que apesar de também ser um recurso fóssil apresenta menor taxa de emissão por energia gerada (ENERGY INSTITUTE, 2023). Dessa forma, estima-se que 80% das reservas globais de carvão mineral não poderão ser queimadas para que o aquecimento global seja controlado em níveis bem abaixo de 2°C, conforme prega o Acordo de Paris (IPCC, 2022a). Isso põe em situação de vulnerabilidade socioeconômica muitas regiões que dependem da cadeia produtiva do carvão mineral (SNYDER, 2018); e é particularmente mais grave para as comunidades dependentes das atividades de mineração, haja vista a dificuldade que tipicamente há para o estabelecimento de novas atividades localmente e a característica inflexibilidade da mão-de-obra do setor (GAMBHIR; GREEN; PEARSON, 2018).

A indústria de carvão brasileira apresenta um bom exemplo nesse sentido. No Brasil, apesar da décima quinta maior reserva provada no mundo (ENERGY INSTITUTE, 2023), o carvão mineral nacional representa uma parcela apenas ligeiramente superior a 2% de participação na geração elétrica (EPE, 2023). Contudo, os recursos e, conseqüentemente, a indústria estão concentrados na região Sul do país. As atividades se desenvolvem em dois polos principais que concentram isoladamente toda a cadeia da extração à queima em usina termelétrica, sendo um deles o sul de Santa Catarina e o outro a região da Campanha, no Rio Grande do Sul. Com isso, um posicionamento do país de alinhamento a tendências globais de abandono do carvão mineral poderia representar um impacto modesto sobre o sistema energético nacional, porém provavelmente teria um grande impacto socioeconômico sobre essas regiões.

Nesse contexto, o corpo da literatura científica aponta a transição justa como um imperativo para o sucesso dos esforços de descarbonização. Inclui a necessidade do desenvolvimento de instrumentos de política pública de natureza compensatória, no curto prazo, e emancipatória, no longo prazo, a partir do desenvolvimento de formas de produzir no futuro para as regiões que outrora dependiam da indústria carbonífera em novos setores. Há ainda quem questione a viabilidade social de uma transição energética alinhada à limitação do aquecimento global em 1,5°C em

função dos impactos sobre o setor carbonífero (GAMBHIR; GREEN; PEARSON, 2018; GREEN, F.; GAMBHIR, 2020; SPENCER *et al.*, 2018).

Isso denota uma ideia dominante de que a descarbonização representa, por definição, o fim da indústria carbonífera, devendo os esforços de longo prazo para a transição justa se concentrar na busca pelo desenvolvimento de atividades em novos setores para as economias locais. Dessa forma, há uma lacuna na literatura sobre possíveis formas para a indústria carbonífera contribuir para com os esforços de descarbonização.

1.2 Pergunta de pesquisa, formulação do problema e objetivos

1.2.1 Pergunta de pesquisa e formulação do problema

O presente estudo parte da seguinte pergunta de pesquisa: é possível que a descarbonização crie oportunidades de novos negócios para a indústria carbonífera? A partir desta pergunta, o problema da tese é formulado como o seguinte teste de hipótese:

Hipótese nula (H0): *“não há espaço para a indústria carbonífera em um contexto de descarbonização da economia.”*

Hipótese alternativa (H1): *“o contexto de descarbonização pode criar oportunidades de novas atividades para a indústria carbonífera, proporcionando caminhos possíveis para uma transição justa.”*

Em função do caráter essencial que as emissões negativas possuem para a descarbonização, de acordo com os principais estudos sobre trajetórias de longo prazo (FUSS *et al.*, 2014; KÖBERLE, 2019; MINX *et al.*, 2018; VAN VUUREN *et al.*, 2018), este estudo concentra-se na busca por sistemas que incluam a indústria carbonífera como peça-chave e sejam capazes de proporcionar serviços de remoção de carbono da atmosfera.

1.2.2 Objetivos

Dada a formulação proposta para o problema e seu escopo, o objetivo geral do estudo é propor e avaliar ao menos um arranjo produtivo inovador com a participação da indústria carbonífera que seja capaz de proporcionar um caminho

para a transição justa da indústria por meio da provisão de serviços de remoção de carbono da atmosfera. Para alcançá-lo, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- (i) Revisar a literatura sobre metas e requisitos para mitigação da mudança climática;
- (ii) Revisar a literatura sobre os impactos da descarbonização sobre o setor de carvão mineral;
- (iii) Revisar a literatura sobre as principais tipologias de instrumentos empregados no âmbito da transição justa;
- (iv) Propor ao menos um sistema com a participação da indústria do carvão que proporcione o serviço de remoção de carbono da atmosfera;
- (v) Avaliar ao menos um dos sistemas propostos aplicado a um estudo de caso, no âmbito técnico-econômico e com relação a suas implicações para uma transição justa para a indústria carbonífera local; e
- (vi) Propor instrumentos de política pública para facilitar a implementação do sistema proposto e outros similares.

1.3 Estrutura da tese

Além deste capítulo introdutório, a tese é estruturada em outros cinco capítulos. O capítulo 2 traz uma revisão da literatura a respeito do papel do carvão mineral nas transições energéticas do passado e na em curso. O capítulo 3 apresenta um breve panorama da indústria de carvão brasileira. No capítulo 4 são apresentadas propostas de três sistemas alternativos, em linha com os objetivos estabelecidos. O primeiro sistema é tratado em maior nível de detalhe que os demais, já que seu modelo foi selecionado para ser aplicado no estudo de caso. Este estudo é apresentado no capítulo 5, tendo como escopo o estado de Santa Catarina. O capítulo 5 traz a metodologia para modelagem e análise técnico-econômica do sistema, os resultados e discussões e outras análises complementares, tais como suas implicações para a transição justa no contexto considerado. Por fim, o capítulo 6 traz a conclusão do trabalho, assim como apresenta as limitações do trabalho e sugestões para estudos futuros.

2 O carvão mineral e a transição energética justa

2.1 O carvão no desenvolvimento das sociedades modernas

As transformações vistas nos sistemas de energia são de grande valia para o estudo do desenvolvimento das sociedades humanas. Ainda na pré-história, a transição do período Paleolítico para o Neolítico, marcada pela Revolução Agrícola, representou o surgimento dos primeiros grupos humanos sedentários, que vieram a se tornar predominantes frente aos grupos de humanos coletores e caçadores nômades (HARARI, 2017). Tal transformação apenas foi possível em virtude do domínio dos fluxos naturais de energia e do trabalho dos seres humanos e dos animais domesticados, que propiciaram os serviços energéticos requeridos de aquecimento, iluminação e trabalho. A energia mecânica dependia da tração muscular, animal e humana, sendo posteriormente complementada pelo aproveitamento de fluxos de água e vento. Já as demandas energéticas de aquecimento e iluminação, para além da incidência da radiação solar, eram exclusivamente supridas pela queima de biomassa tradicional¹ (GRUBLER *et al.*, 2012).

Esse modelo de sistema energético, fundado no Neolítico, vigorou por milênios, provendo as bases para o surgimento de grandes sociedades humanas. Por definição, neste modelo a capacidade de gerar potência e a disponibilidade de energia dependem exclusivamente dos potenciais de recursos energéticos existentes localmente. Wrigley (2013) propõe a nomenclatura “economias orgânicas” aos sistemas exclusivamente dependentes de fluxos energéticos localmente disponíveis, sobretudo da biomassa tradicional. Para o autor, as economias orgânicas operam sob a restrição da capacidade das plantas em armazenarem a energia solar incidente por meio da fotossíntese. Assim, o crescimento das sociedades torna-se limitado por restrições biofísicas dos fluxos energéticos disponíveis localmente e da capacidade

¹ Goldemberg e Coelho (2004) propõem uma definição separada de biomassa tradicional e moderna, com base no modo de produção e uso do recurso energético. Para os autores, a biomassa tradicional é produzida de forma não sustentável e empregada em aplicações não comerciais, geralmente com baixa eficiência para fins de aquecimento e cocção de alimentos. Já a biomassa moderna é produzida em sistemas de produtos e resíduos agrícolas, florestais e urbanos com manejo sustentável, sendo convertida com maior eficiência em outros vetores energéticos, particularmente calor, eletricidade e biocombustíveis.

de armazenamento do fluxo de energia solar incidente, por fotossíntese, nas áreas adjacentes dentro de um raio em que a coleta de biomassa é viável. Evidências disso foram problemas de escassez aguda de lenha e carvão vegetal no norte da China ao longo do século XVIII e na Europa, particularmente no Reino Unido, em função da superexploração das florestas sem o replantio e manejo adequado (POINTING, 1992 *apud* GRUBLER *et al.*, 2012).

As restrições de potência e energia são superadas com o advento dos primeiros motores a vapor, movidos a carvão mineral, pioneiramente na Grã-Bretanha, no contexto da Revolução Industrial. Vale ressaltar que o uso energético de carvão no Reino Unido já existia desde os tempos da Roma antiga, assim como aplicações de carvão como fonte de energia térmica também já eram usuais antes da Revolução Industrial, por exemplo para fundição de minério de ferro e produção de cerveja (PERLIN, 1989 *apud* GRUBLER *et al.*, 2012). A grande inovação do motor a vapor foi sua capacidade pioneira de converter a energia térmica da queima do carvão em energia mecânica² (GRUBLER *et al.*, 2012; HARARI, 2017).

A primeira aplicação bem-sucedida para o motor a vapor foi inventada por Thomas Newcomen, em 1712, na qual o motor foi acoplado a uma bomba hidráulica, visando a dragagem de áreas alagadas de minas de carvão (ALLEN, 2012; GRUBLER, 2012; GRUBLER *et al.*, 2012; HARARI, 2017). As primeiras máquinas de Newcomen eram altamente ineficientes. Portanto, seu sucesso valeu-se do contexto de sua implementação, em termos de oferta e demanda de energia: a grande disponibilidade de partículas finas não aproveitáveis comercialmente de carvão nos sítios de mineração provia uma fonte de energia barata às máquinas, enquanto a elevada demanda por dragagem das minas nas zonas de exploração das jazidas deu a utilidade necessária ao serviço prestado pelos motores³ (ALLEN,

² Antes do motor a vapor, outro avanço na conversão de energia térmica em mecânica fora a descoberta da pólvora no século IX, na China, que culminou no desenvolvimento das primeiras artilharias eficazes apenas 600 anos depois (HARARI, 2017).

³ É importante destacar que, de acordo com Allen (2012), a disponibilidade de recursos carboníferos de baixo custo foi apenas um dos fatores que explicam o berço britânico da Revolução Industrial. Outro elemento fundamental é que, comparando com a realidade contemporânea de outros países, o custo relativo da mão-de-obra no período na Inglaterra era consideravelmente mais alto, em relação ao custo da energia e do capital. Isso viabilizou o uso massivo das primeiras máquinas a vapor na produção de bens, pois, ainda que fossem ineficientes, eram capazes de prover importantes ganhos em produtividade da mão-de-obra (ALLEN, 2012).

2012; HARARI, 2017). A partir daí, os motores a vapor foram continuamente aperfeiçoados, ganhando mais eficiência energética, e empregados em novas aplicações estacionárias, particularmente na indústria têxtil, e móveis, nas locomotivas e navios a vapor, dando origem à Revolução Industrial do século XVIII (ALLEN, 2012; GRUBLER, 2012; GRUBLER *et al.*, 2012; HARARI, 2017; WRIGLEY, 2013).

Para além das fábricas, o carvão mineral também alimentou o processo de urbanização que veio a reboque da Revolução Industrial inglesa, particularmente em Londres. A população londrina cresceu exponencialmente com o advento da industrialização, saindo de 200 mil pessoas para 1 milhão de pessoas entre o início do século XVII e o fim do século XVIII (ALLEN, 2012). Tal concentração populacional passou a exercer crescente pressão sobre a oferta de lenha, que era então o combustível preferencial para abastecer à demanda de energia para aquecimento residencial da população. Assim, à medida em que a cidade crescia e requeria mais energia, fazia-se necessária a exploração de áreas cada vez maiores e mais distantes de floresta para atender às necessidades da população, o que representava um crescente aumento no preço da lenha (ALLEN, 2012). Por outro lado, o aumento da escala do comércio de carvão mineral, impulsionado pelas fábricas, proporcionara uma oferta abundante do vetor energético na cidade, a preços cada vez menores. Dessa forma, as residências passaram continuamente a substituir a biomassa tradicional por carvão mineral para suprir suas demandas por aquecimento, inclusive adaptando sua arquitetura típica para a queima do novo combustível: os fornos a lenha abertos no centro das habitações deram espaço às novas lareiras com chaminés altas para exaustão dos gases tóxicos do carvão mineral (ALLEN, 2012).

Para Wrigley (2013), a massificação do uso de carvão mineral a partir da Revolução Industrial inaugura as economias baseadas em combustíveis fósseis, em substituição às economias orgânicas. Desta forma, a restrição de potência energética imposta pela existência de recursos locais de fluxo perde importância, frente à disponibilidade de grandes reservas dos recursos energéticos fósseis. Passa a existir apenas uma restrição do estoque de energia, dada a natureza finita dos combustíveis

fósseis. Com isso, o autor afirma que a descoberta e exploração do carvão mineral foi uma condição necessária para a superação da barreira energética imposta pela fotossíntese nas economias orgânicas, permitindo a existência de um período de crescimento exponencial (WRIGLEY, 2013).

2.2 Transições energéticas observadas no século XX

De forma mais ampla, os períodos que marcam o surgimento de um novo sistema de energia são conhecidos como transições energéticas, sendo fenômenos sociais complexos. Apesar da complexidade do tema, as transições energéticas são usualmente associadas a elementos específicos, como uma fonte de energia, uma tecnologia ou um conversor de energia (SOVACOO, 2016). Mais comumente, as transições energéticas são associadas apenas às mudanças nas fontes primárias de energia, como no caso, mencionado em Laird (2013), do discurso do presidente dos EUA Jimmy Carter. Na ocasião do anúncio das metas e políticas do Plano Nacional de Energia para lidar com a primeira crise do petróleo, nos anos 1970, Carter declarou: *“America is now at an historic turning point as the postwar era of oil and gas comes to a close. America has made two major energy transitions in the past...”*, referindo-se à substituição da lenha por carvão e, posteriormente, do carvão por petróleo enquanto principal fonte primária de energia do país. Tal abordagem sobre as transições energéticas, porém, é objeto de críticas com relação à superficialidade em definir tais fenômenos⁴.

Não obstante, a observação da evolução do uso da energia primária ao longo da história mostra-se útil para localizar no tempo as transições energéticas. Sovacool (2016) propõe que o ponto de partida para uma transição energética é o momento em que uma fonte ou tecnologia passa a ocupar 1% da fatia do mercado avaliado. De forma mais específica, Smil (2010a) propõe um limiar temporal em sua definição de transição energética, desde o momento em que um combustível ou máquina é introduzido até sua ascensão a 25% da participação do mercado regional ou global, a depender do escopo considerado. Quando o limiar de 50% da

⁴ De acordo com os críticos, a ideia de uma mera troca da principal fonte de energia primária mascara as dimensões sociais e políticas por trás desses complexos fenômenos com uma concepção de que as opções tecnológicas são limitadas (FOUQUET; PEARSON, 2012; HIRSH; JONES, 2014; LAIRD, 2013; SOVACOO, 2016).

participação é alcançado, Grubler (2012) denomina a ocorrência de uma “grande transição”. A Figura 2-1 apresenta a evolução do uso histórico de energia primária no mundo desde a metade do século XIX até o início do século XXI, segregado por fonte. Na figura também são identificados os momentos históricos que marcam o ingresso de tecnologias-chave para o consumo de energia. É possível verificar o crescimento exponencial do uso de energia pela sociedade desde o advento da Revolução Industrial.

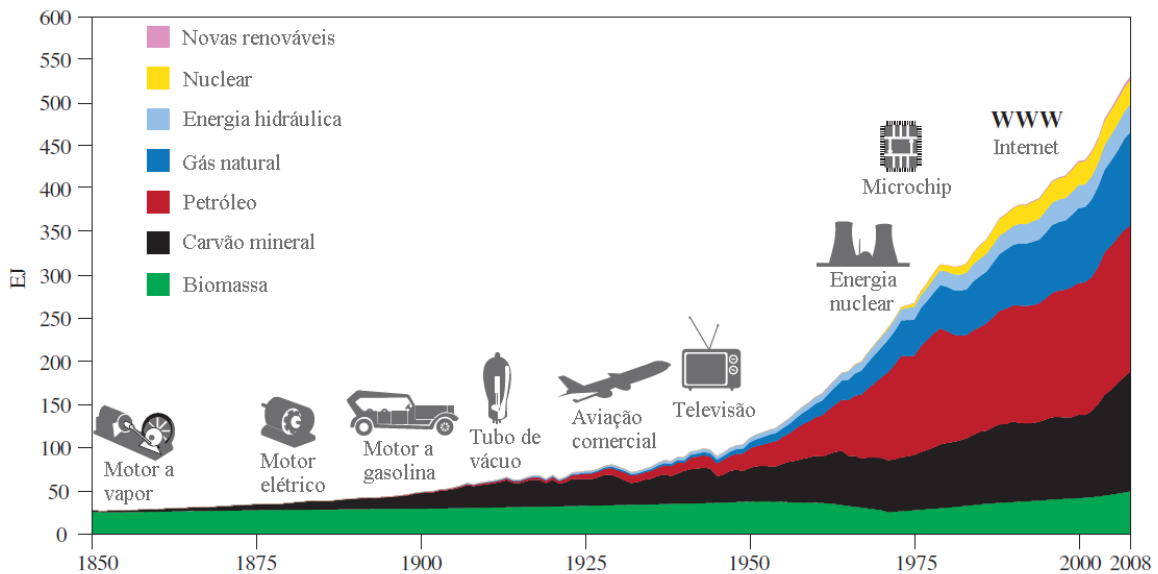


Figura 2-1. Evolução do consumo global de energia primária por fonte

Fonte: Adaptado de Grubler *et al.* (2012)

A Figura 2-2 apresenta a evolução da parcela de uso de cada fonte de energia, com os mesmos dados da Figura 2-1. É possível perceber um aumento contínuo do consumo de carvão mineral no mundo até a segunda década do século XX, tanto em termos absolutos e, particularmente, na participação da matriz energética global. Tal período é referido como a primeira grande transição energética global (GRUBLER, 2012; GRUBLER *et al.*, 2012; SMIL, 2016). Após esse pico, há uma relativa estabilização do consumo de carvão, em termos absolutos, porém uma queda em sua participação na matriz global, com a emergência de outras fontes de energia, particularmente do petróleo. Isso se dá, por um lado, pela crescente diversificação de fontes na oferta de energia, mas principalmente pelo aumento das tecnologias de uso final de energia. Nesse sentido, destaca-se o crescente emprego de eletricidade enquanto vetor energético para alimentar máquinas capazes de fornecer serviços de

iluminação, trabalho e aquecimento, além do advento dos motores de combustão interna em carros, ônibus e aeronaves, que revolucionaram a mobilidade coletiva e individual no mundo (GRUBLER, 2012; GRUBLER *et al.*, 2012; HIRSH; JONES, 2014).

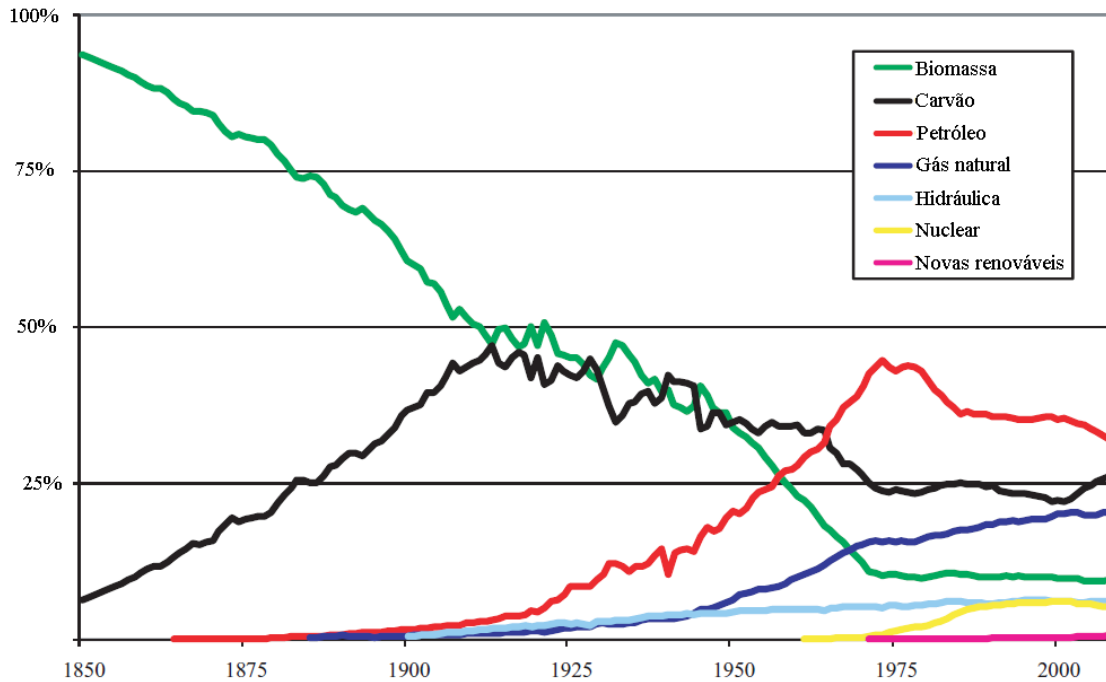


Figura 2-2. Evolução histórica da estrutura do consumo global de energia primária

Fonte: Adaptado de Grubler *et al.* (2012)

Entretanto, é importante destacar que os fenômenos globais das grandes transições são, em verdade, compostos por diversas transições contemporâneas em nível nacional, cada qual ocorrendo com características e ritmos próprios (GRUBLER, 2012; SMIL, 2016; SOVACOOOL, 2016). Isso implica que, por trás da figura global consolidada indicando a mudança da participação das fontes de oferta de energia primária, há um complexo conjunto de elementos existentes em uma ampla diversidade de contextos nacionais. Nesse sentido, quanto maior o trabalho, capital e esforço empregado em uma indústria ao longo do tempo, maior o nível de trancamento tecnológico (*lock-in*) associado, ou seja, mais difícil se torna a contestação do regime incumbente por inovações tecnológicas (SOVACOOOL, 2016).

Tal assertiva encontra respaldo em evidências históricas, como as apontadas em Grubler (2012), que verificou na Europa uma relação inversa entre o centro e a

periferia da primeira para a segunda grande transição energética. Ou seja, os países que alcançaram mais cedo a entrada do carvão mineral em substituição à lenha, particularmente Inglaterra, Alemanha e França, foram os últimos a verificar a substituição da predominância do carvão mineral por fontes de energia moderna⁵ na matriz energética. No polo oposto, aqueles países que adotaram o carvão mineral como fonte predominante mais tardiamente, como Portugal, Suécia e Itália, observaram mais cedo a transição às fontes de energia moderna (GRUBLER, 2012). Similarmente, Rubio e Folchi (2012) verificaram que a maioria dos países da América Latina substituiu o carvão mineral pelo petróleo como fonte predominante de energia primária cerca de 30 a 40 anos antes da ocorrência desta transição nas nações industrializadas do Norte Global, datada em aproximadamente 1950. Em particular, o Brasil foi uma das últimas nações da região a verificar tal substituição, tendo o petróleo passado a ser a fonte energética predominante em 1940 (RUBIO; FOLCHI, 2012).

O caráter de flexibilidade diferenciado dos países à mudança de seu sistema energético vigente pode ser representado pela abordagem conceitual dos regimes sociotécnicos (GEELS, 2002; GEELS; SCHOT, 2007), apresentada brevemente na subseção a seguir.

2.3 Os regimes sociotécnicos

Uma das abordagens chave de análise das transições energéticas dá-se pela conceituação da transição entre regimes sociotécnicos (GEELS, 2002, 2018; GEELS; SCHOT, 2007; HANSEN *et al.*, 2018; SOVACOOOL, 2016; TRAN; EGERMANN, 2022). Na epistemologia dos sistemas sociotécnicos, a tecnologia é vista de forma intrinsecamente ligada à capacidade humana e às estruturas sociais. Esses sistemas são compostos por elementos diversos, como artefatos físicos, organizações e recursos, funcionando para atingir objetivos específicos e incorporando aspectos sociais, políticos e culturais. Além disso, as interações entre grupos da sociedade, como indústria, usuários e formuladores de políticas, são um aspecto chave na configuração dos sistemas sociotécnicos. Mudanças nesses sistemas ocorrem quando elementos são reorganizados, propagando alterações em

⁵ Grubler (2012) refere-se a petróleo, gás natural e eletricidade como fontes de energia moderna.

outros elementos que levam a uma nova configuração para toda a rede (GEELS, 2002).

Assim, para análise dos complexos fenômenos de transição tecnológica, Geels (2002) propõe um modelo teórico que utiliza os sistemas sociotécnicos como objeto, para o qual cunhou o termo de Perspectiva Multinível (MLP, do inglês *Multi-Level Perspective*). O modelo consiste em três camadas interdependentes e aninhadas, hierarquizadas em uma ordem crescente de estruturação e estabilidade das atividades envolvidas (WANG *et al.*, 2022). O nível intermediário (meso) consiste nos regimes sociotécnicos, que se referem ao sistema estabelecido de regras, práticas e tecnologias preponderantes em um domínio específico, representando o status quo resistente à mudança. O nível inferior (micro) é denominado nicho, em que as inovações emergem de forma dinâmica em pequena escala, vislumbrando uma chance de contestação dos regimes incumbentes. Acima do nível do regime (macro) encontra-se a paisagem sociotécnica, que congrega elementos amplos do contexto nos quais os regimes sociotécnicos se compreendem, tais como fatores socioeconômicos, técnicos e culturais, exercendo influência exógena sobre os regimes estabelecidos (GEELS, 2002, 2010, 2011, 2018). A Figura 2-3 representa esquematicamente os níveis hierárquicos da MLP.

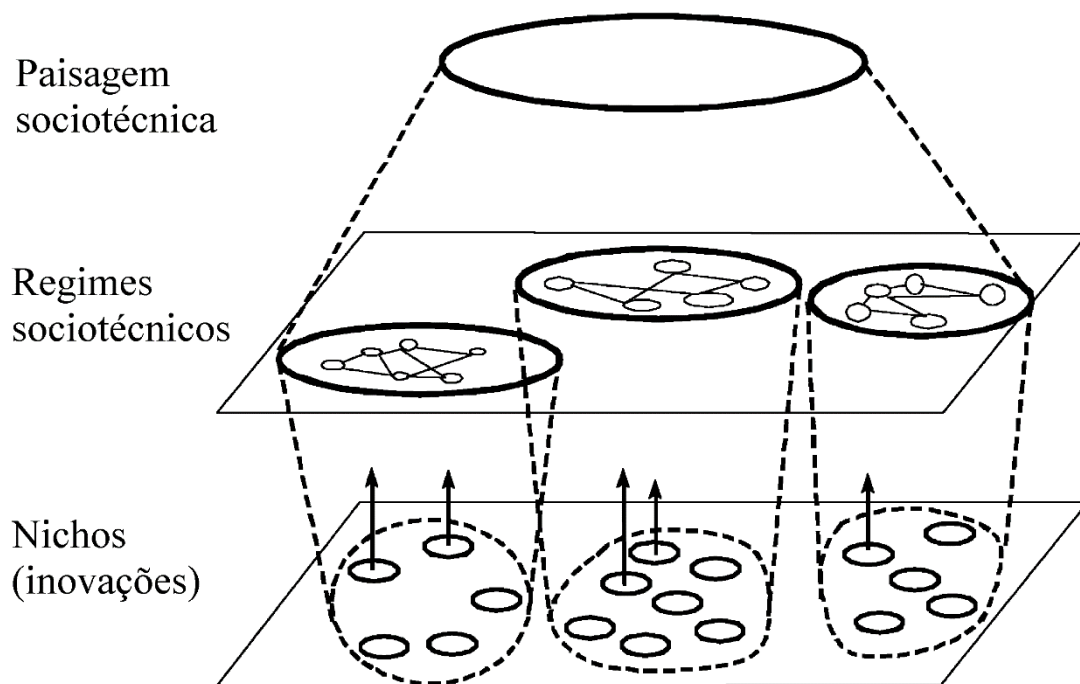


Figura 2-3. Hierarquia conforme a perspectiva sociotécnica multinível

Fonte: Adaptado de Geels (2002)

Nesse sentido, os regimes sociotécnicos buscam resistir às pressões para mudança tanto de cima, ou seja, de fatores exógenos advindos da paisagem sociotécnica, quanto de baixo, ou seja, de inovações que surgem com a esperança de ascender de nível. Com isso, a mera existência inovações tecnológicas capazes de oferecer melhores serviços energéticos, apesar de ser uma condição necessária, não justifica por si só a ocorrência das transições energéticas ao longo da história. Há na verdade diferentes caminhos possíveis para transições.

Geels e Schot (2007) utilizam o modelo da MLP para propor tipologias de caminhos para a transição de regimes sociotécnicos, formuladas como combinações de *timing* e da natureza das interações multinível. O *timing* refere-se ao acoplamento temporal entre o momento em que a paisagem exerce pressões sobre o regime sociotécnico e a existência de inovações no nível do nicho suficientemente desenvolvidas⁶ para contestar o regime. Já a natureza das interações diz respeito às

⁶ Os autores definem as seguintes proxies para averiguar se a inovação se encontra em grau de desenvolvimento suficiente para contestar o regime sociotécnico: (i) existência de um design dominante; (ii) entrada de atores poderosos na rede de suporte à inovação em questão; (iii) demonstração clara de ganhos e/ou potencial de aumento de performance; e (iv) entrada da inovação em nichos que somados ocupem pelo menos 5% do mercado.

relações da paisagem e das inovações do nicho com o regime sociotécnico, ora se vêm a reforçar ou romper com o status quo.

Via de regra, a mudança de regime sociotécnico requer a existência de pressões exógenas, portanto uma paisagem que o reforça não cria um ambiente para mudanças, ainda que existam inovações nos nichos tecnicamente prontas para contestar o regime sociotécnico vigente. Já pela perspectiva do nicho, as inovações que são desenvolvidas podem tanto ter um caráter competitivo quanto simbiótico com o regime vigente (GEELS; SCHOT, 2007). Assim, Geels e Schot (2007) apresentam quatro tipologias básicas de caminhos para transição de regimes sociotécnicos:

- 1) Caminho de transformação: dado quando há pressões moderadas para mudança, mas não há ainda uma inovação suficientemente desenvolvida para substituir o regime incumbente, levando a uma reorientação dos próprios atores do regime.
- 2) Caminho de desalinhamento e realinhamento: ocorre quando há uma forte e repentina pressão da paisagem sobre o regime sem que haja também uma solução única para sua substituição, o que leva à emergência de múltiplas inovações do nicho para buscar ocupar o espaço deixado pelo regime incumbente.
- 3) Caminho de substituição tecnológica: nesse caminho também há uma pressão forte e repentina sobre o regime incumbente, mas já há uma inovação preponderante no nicho, que pode rapidamente substituir o elemento contestado do regime sociotécnico, provocando um efeito cascata que vem a alterar toda a estrutura incumbente.
- 4) Caminho de reconfiguração: dado pelo desenvolvimento, no nicho, de inovações simbióticas com o regime sociotécnico incumbente para resolver problemas pontuais, mas que terminam por desencadear alterações nas estruturas do próprio regime.

Os autores também incluem um quinto tipo de caminho de transição, formado pela combinação de duas ou mais tipologias em resposta a pressões para mudança disruptiva que a paisagem possa exercer sobre os regimes sociotécnicos. Trazem a

mudança climática como exemplo de tema capaz de levar a pressões da paisagem para mudanças disruptivas, particularmente nos regimes sociotécnicos de energia e transportes (GEELS *et al.*, 2016; GEELS; SCHOT, 2007).

2.3.1 O ponto de vista do regime incumbente

A perspectiva de caminhos para a transição energética apresenta uma visão geral sobre o regime sociotécnico vigente e as pressões provenientes da paisagem e do nicho (GEELS, 2010, 2011; GEELS *et al.*, 2016). Uma outra forma interessante de análise é a que trata das transições pela perspectiva do regime incumbente (SOVACOOOL *et al.*, 2020; TURNHEIM, 2012; TURNHEIM; GEELS, 2019; TURNHEIM; SOVACOOOL, 2020).

Para analisar as transições pela perspectiva da indústria incumbente, propõe-se um modelo de estrutura triplamente enraizada (tradução livre para *triple embedness framework*). Neste modelo, os atores da indústria estão estruturados nas instituições próprias de seu regime industrial, mas também se encontram enraizados em um ambiente econômico e um outro sociopolítico. Sendo assim, os atores da indústria sofrem pressões dos ambientes externos e reagem guiados pelo regime industrial (TURNHEIM; GEELS, 2012). Assim, os autores propõem um modelo sequencial de fases para a desestruturação do regime incumbente, apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Modelo de fases para desestabilização de um regime incumbente

Fase	Descrição
1. Cegueira e Negação	<ul style="list-style-type: none"> • Pressões externas são fracamente articuladas, a princípio. • Atuação dos atores industriais na negação dos problemas de desempenho ou avaliação deles como temporários, frequentemente associados à recessão. • Minimização do problema, mantendo o comprometimento com o regime existente.
2. Respostas Incrementais aos Problemas	<ul style="list-style-type: none"> • Pressões externas se tornam mais claras e vinculadas a problemas de desempenho. • Atores da indústria reconhecem os problemas, mas as estratégias continuam defensivas, com foco em controles mais rígidos, inovação incremental e diversificação precoce. • Comprometimento com o regime permanece forte.
3. Aumento de Dúvidas e Diversificação	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de pressões e problemas gera lacunas no desempenho. • Atores da indústria começam a duvidar da viabilidade de elementos do regime existente e exploram soluções fora de suas fronteiras. • Atividades de diversificação e exploração sinalizam enfraquecimento do comprometimento.
4. Declínio e Desestabilização	<ul style="list-style-type: none"> • Problemas se tornam crises, aumentando a urgência. • Atores da indústria perdem o crédito no regime existente e implementam estratégias de mudança drástica, que dependendo da visão sobre a severidade do problema e da propensão dos atores à mudança radical, pode vir de duas formas: <ol style="list-style-type: none"> a) Reorientação: mudanças substanciais em alguns elementos do regime (tecnologia, regulação, base de conhecimento), buscando novos meios para a sobrevivência. b) Recriação: mudanças mais profundas nos elementos centrais do regime (missão, identidade, convicções), buscando o desenvolvimento de novas esperanças para uma nova indústria.
5. Dissolução	<ul style="list-style-type: none"> • Se as mudanças não resolvem os problemas, atores perdem a fé e abandonam as perspectivas de sobrevivência. • A indústria tenta maximizar o tempo do declínio, evitando um colapso total e explorando os ativos restantes.

Fonte: Adaptado de Turnheim e Geels (2012)

Um exemplo interessante é o estudo de caso da desestruturação do regime sociotécnico do carvão mineral no século XX no berço mundial da indústria carbonífera, a Inglaterra, para o qual Turnheim e Geels (2012) trazem uma leitura pela perspectiva do regime incumbente no século XX, particularmente no período de 1913 a 1997. Como é possível observar na Figura 2-4, no início do século XX o carvão mineral possui uma posição hegemônica em termos da participação na geração elétrica no Reino Unido. Contudo, a partir dos anos 1960, outras fontes de energia começam a disputar o mercado com o carvão mineral, que vai continuamente perdendo espaço na geração elétrica.

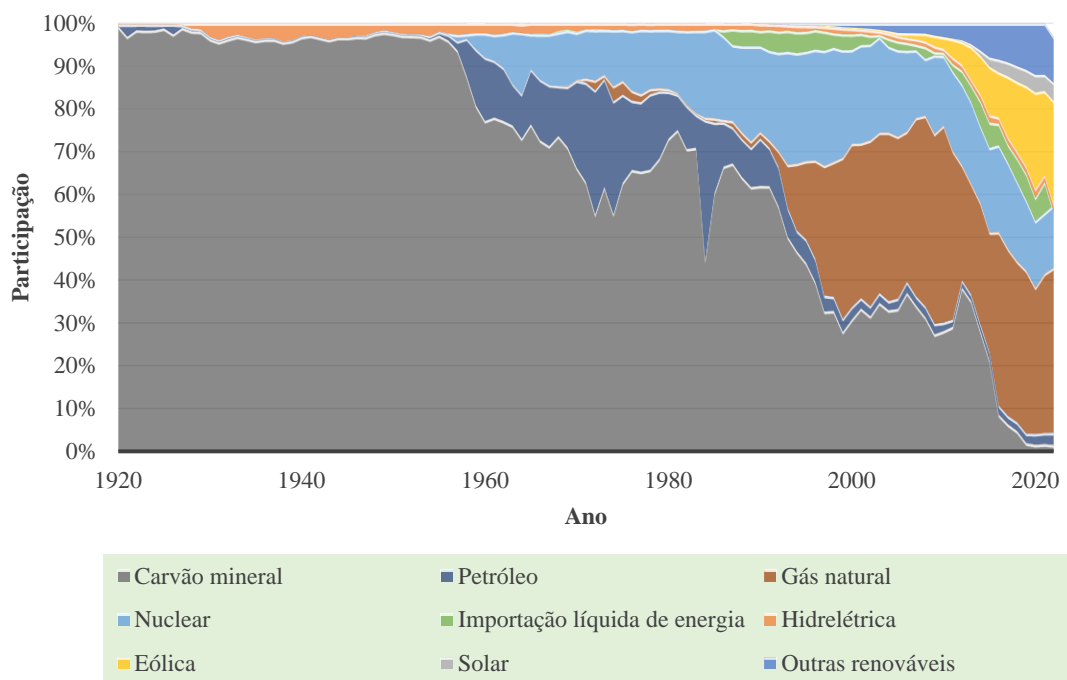


Figura 2-4. Evolução da participação das fontes de energia primária na geração elétrica no Reino Unido entre 1920 e 2020

Fonte: Elaborado a partir de dados de Ritchie, Roser e Rosado (2022)

As lições aprendidas com a análise apontam que as pressões no ambiente econômico no período foram as causas diretas da desestabilização da indústria carbonífera britânica, enquanto as pressões no ambiente sociopolítico foram fatores de mediação. A ciência e os movimentos sociais apontaram os problemas ambientais do uso do carvão, como as questões da fumaça e da chuva ácida, muito antes de esses problemas impactarem o regime. Entretanto, no ímpeto de preservar

as suas estruturas, ao invés de reconhecer, a indústria inicialmente empenhou esforços para lidar com o problema negando a sua existência ou se eximindo de suas responsabilidades, apontando-as para o usuário final. Isso, de forma geral, atrasou a busca por soluções para os problemas ambientais pela própria indústria carbonífera. Assim, quando as pressões do ambiente econômico se impuseram, inovações associadas a outras fontes de energia puderam emergir do nicho e contestar os mercados do carvão mineral no Reino Unido (TURNHEIM; GEELS, 2012).

2.4 A transição energética do século XXI

A transição energética vislumbrada para o século XXI caminha no sentido da redução das emissões de GEE, principalmente de CO₂, pelo uso de energia no mundo, ou seja, da descarbonização do sistema energético global. Isso, de certa forma, a aproxima das transições energéticas observadas no passado, permitindo o uso de lições aprendidas a partir de análises críticas da história (ALLEN, 2012; FOUQUET; PEARSON, 2012; GEELS, 2002; GRUBLER, 2012; HIRSH; JONES, 2014; TURNHEIM; GEELS, 2012). Entretanto, há também diferenças cruciais entre a natureza e o desafio da transição de baixo carbono em relação às anteriores, que tem importância fundamental para compreensão de seus caminhos possíveis.

Um ponto fundamental dessa diferença está na motivação por trás da descarbonização. As transições energéticas observadas no passado foram frutos de processos multidimensionais e bidirecionais de contestação e desestabilização de regimes sociotécnicos incumbentes, que abriram espaço para inovações tecnológicas. Ou seja, as transições pretéritas tiveram um caráter evolucionário, guiadas por uma complexa interação entre os elementos contextuais da paisagem sociotécnica vigente e as inovações tecnológicas ora disponíveis. Assim, seria impossível prever seus desdobramentos antes de sua ocorrência, de forma que as transições energéticas só existem como um fenômeno a partir de uma perspectiva do futuro para o passado (GEELS, 2002; GRUBLER, 2012; TURNHEIM; GEELS, 2012).

Por sua vez, a transição energética para o século XXI parte de um diagnóstico da ciência sobre um problema global crônico que ameaça a vida na Terra, a mudança do clima. Contudo, dada a natureza temporal desacoplada entre sua causa

(emissões de GEE) e os seus efeitos, as soluções para a mudança climática requerem que a transição energética ocorra antes que seus efeitos se imponham. Isso denota um perfil mais planejado e coordenado para direcionar os caminhos dos sistemas de energia no sentido da descarbonização, diferente da natureza mais circunstancial das transições energéticas anteriores (SOVACOOOL, 2016).

York e Bell (2019) apontam o núcleo da diferença entre a transição energética do século XXI e as anteriores valendo-se de um recurso semântico. Para os autores, o termo “transição energética” visto pela perspectiva da evolução da participação das fontes de energia primária no mix global (Figura 2-2) fornece uma ideia imprecisa sobre o fenômeno. Quando se verifica a figura do consumo absoluto de energia primária (Figura 2-1), é possível notar que o crescimento de uma nova fonte não ocorre em detrimento da incumbente, mas de forma adicional. À figura consolidada, corroboram as evidências de outros estudos mais específicos, que avaliaram não haver um efeito significativo de substituição de combustíveis fósseis pela entrada de novas fontes renováveis (YORK, 2012), nem de carvão mineral pela entrada de gás natural (GREINER; YORK; MCGEE, 2018). Com isso, os autores trazem a provocação semântica de que as transições energéticas pretéritas seriam melhor qualificadas como “adições energéticas” (YORK; BELL, 2019).

De fato, ao observar o perfil temporal do consumo de carvão no mundo nos últimos 80 anos, apresentado na Figura 2-5, faz sentido a colocação de York e Bell (2019). Vale ressaltar, porém, que o padrão evolucionar do consumo do carvão mineral não foi homogêneo no mundo. Desde o início dos anos 2000, houve um aumento expressivo do consumo de carvão na região Ásia-Pacífico, puxado sobretudo pela China, na contramão das demais regiões do mundo, que apresentaram tendência de queda. Contudo, o aumento asiático do consumo de carvão foi tão expressivo que puxou a tendência global de consumo de carvão mineral para cima, sobretudo a partir dos anos 2000, que entre 2002 e 2022 saiu de aproximadamente 103 para 159 EJ por ano, respectivamente (ENERGY INSTITUTE, 2023). A Tabela 2.2 apresenta os de níveis consumo de carvão, em base energética, em 2002 e 2022 para os principais centros de consumo do energético no mundo.

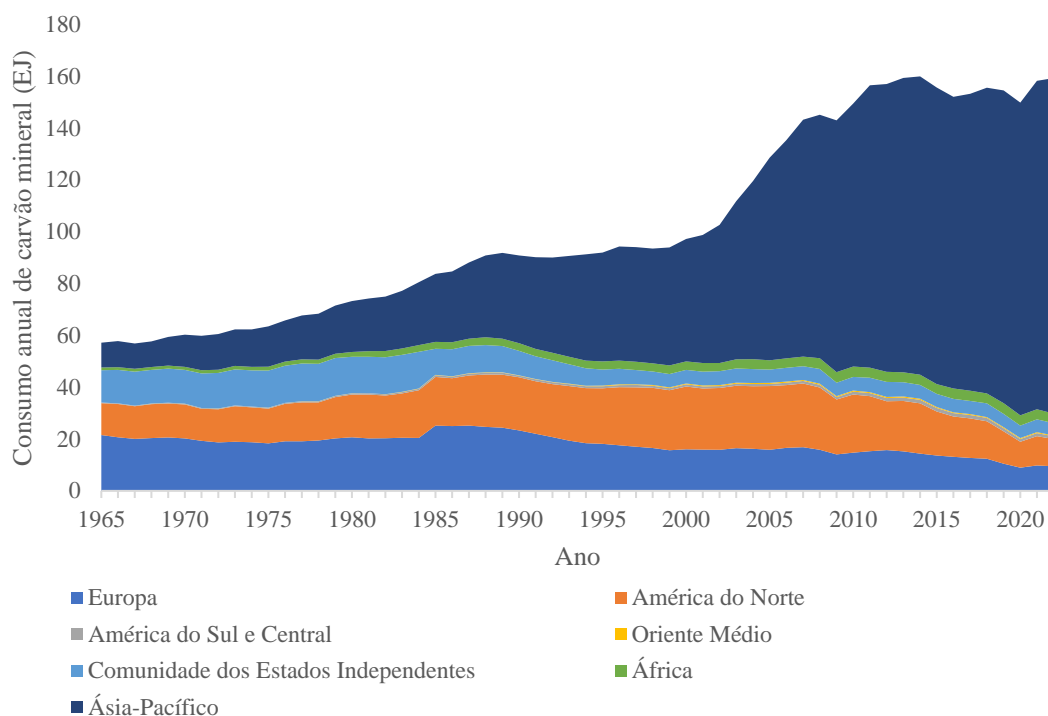


Figura 2-5. Evolução temporal do consumo de carvão mineral no mundo em base energética

Fonte: Elaborado com dados de Energy Institute (2023)

Tabela 2.2. Consumo de carvão mineral, em base energética, nos principais centros do mundo

País/Região	Consumo de carvão mineral (EJ)		Variação
	2002	2022	
China	34,08	88,41	159%
Índia	7,25	20,09	177%
Europa	15,87	9,52	-40%
EUA	21,95	9,87	-55%
Mundo	102,66	159,23	55%

Fonte: Elaborado com dados de Energy Institute (2023)

Assim sendo, York e Bell (2019) propõem que uma transição energética deve contemplar tanto o elemento de ascensão de um novo regime, quanto o declínio do regime incumbente. Com isso, a descarbonização deve ser alcançada a partir do

desenvolvimento de infraestrutura e capacidade para as novas fontes renováveis de energia em conjunto com o declínio das fontes fósseis.

Portanto, a descarbonização do sistema energético vem de encontro a diversos interesses nacionais, regionais, setoriais e privados. Com isso, o planejamento da descarbonização global da economia requer que se estabeleçam consensos a respeito da gravidade e urgência da mudança climática e de caminhos eficazes e justos para que se alcancem as metas estabelecidas para o controle do aquecimento global.

No que se refere à formação de consenso sobre as causas da mudança do clima, o problema do desacoplamento temporal representa uma dificuldade paradoxal: à medida em que o tempo de inação passa, mais evidentes são os impactos. Se isso, por um lado, facilita o convencimento sobre a gravidade e as causas, por outro lado reduz sensivelmente o espaço para ação. Isso fica evidente quando o WG1 do IPCC lança seu sexto e até então mais recente relatório de avaliação escolhendo uma linguagem com uma força e clareza sem precedentes, chamando de “inequívoca” a influência antrópica sobre a mudança do clima (IPCC, 2021). Por outro lado, o UNEP lança seu mais recente *Emissions Gap Report* com o subtítulo “fechando a janela”, referindo-se à redução da chance de estabilização do aquecimento global em até 1,5°C (UNEP, 2022).

Com relação aos caminhos para a descarbonização, retoma-se o problema de poluição transfronteiriça como complicador (ver a seção sobre “O problema da chuva ácida na Europa”, no Apêndice B), tornando-se pouco relevante a localização geográfica das fontes emissoras de GEE para o agravamento da mudança climática. Contudo, cada país tem suas próprias capacidades, prioridades e responsabilidade histórica para lidar com o problema em sua agenda política. Isso é particularmente relevante para os países em desenvolvimento, que em geral possuem menos capacidade tecnológica e agendas internas de desenvolvimento econômico que se sobrepõem à questão climática, além de menor responsabilidade histórica sobre os GEE já acumulado na atmosfera (CHAPMAN *et al.*, 2018, DA SILVA *et al.*, 2022, GOLDEMBERG *et al.*, 2015). Para suavizar essas questões, criaram-se os mecanismos de transferência tecnológica, que visam prover fluxos financeiros e de conhecimento para que os países possam descarbonizar suas economias sem

comprometer suas agendas econômicas internas, a partir da adoção de soluções tecnológicas adaptadas de outros contextos ou endogenamente desenvolvidas (BOYD, 2012; DE CONINCK; PUIG, 2015; GOLDAR *et al.*, 2019; HOFMAN; VAN DER GAAST, 2019; OCKWELL; BYRNE, 2016; PANDEY; CONINCK; SAGAR, 2022; PUIG; HASELIP; BAKHTIARI, 2018).

Para além dos países, a transição energética almejada para o século XXI também deverá impactar setores, sobretudo os ligados a combustíveis fósseis. Dentre as indústrias fósseis, as atividades associadas ao carvão mineral, sobretudo a geração elétrica, podem ser consideradas as mais vulneráveis a impactos da descarbonização (CARLEY *et al.*, 2018; SNYDER, 2018). Visto que o combustível fóssil que mais emite GEE por unidade de energia gerada (BURNHAM *et al.*, 2012; MYHRVOLD; CALDEIRA, 2012), o carvão tende a perder espaço em um mundo em transição para a descarbonização (DELEVINGE *et al.*, 2020).

Tais impactos trazem repercussões diretas sobre os agentes privados da cadeia do carvão, levando-os a empreender suas estratégias defensivas nos campos econômico, político, tecnológico e sociocultural para manter a estabilidade de seu regime sociotécnico (TURNHEIM; GEELS, 2012). Porém, para além dos agentes privados, os impactos também tendem a repercutir socioeconomicamente em regiões com a economia dependente da exploração desses recursos, causando perdas na geração local de empregos e renda (CARLEY *et al.*, 2018; RISSMAN *et al.*, 2020; SNYDER, 2018). Naturalmente, os impactados tendem a se opor às causas de sua debacle, criando pressões sociais que dificultam a obtenção dos consensos necessários para implementar efetivamente as estratégias de necessárias para a descarbonização. Nesse sentido, faz-se fundamental buscar caminhos para a transição energética que não deixem ninguém para trás, o que se convencionou chamar de “transição justa”, conceito que é apresentado em maior detalhe na seção 2.4.2 deste estudo.

O Pacto de Glasgow pelo Clima (UNFCCC, 2021) menciona esforços para *phase-down* da geração termelétrica a carvão em usinas não abatidas em seu parágrafo 36, reconhecendo na sequência a necessidade de uma transição justa. Para além da transição justa, o texto também reconhece a necessidade de que se

alcancem emissões líquidas nulas de CO₂ e outros GEE por volta da metade do século para que o aquecimento global possa ser limitado a 1,5°C. Nesse sentido, é importante destacar a importância da referência a “emissões líquidas” ao invés de puramente emissões. Isso implica a possibilidade de que o aquecimento global possa se estabilizar mesmo que ainda haja algum nível residual de emissões, desde que estas sejam compensadas por emissões negativas de GEE. Assim, as “emissões negativas” assumem um papel fundamental para os objetivos climáticos, sendo um ativo valioso para a descarbonização. Nesse sentido, a seção seguinte explora como essas emissões negativas são alcançadas e o seu papel nas trajetórias de longo prazo de descarbonização.

2.4.1 Emissões negativas na transição energética do século XXI

As emissões negativas são alcançadas a partir de práticas que reforçam ou criam novos fluxos de carbono desde a atmosfera para os reservatórios inferiores, ou seja, os ecossistemas terrestres e aquáticos e os reservatórios geológicos. Como se trata de intervenções essencialmente sobre o ciclo do carbono, a provisão de emissões negativas também pode ser referida como Remoção de Carbono da Atmosfera (RCA)⁷. Uma tecnologia capaz de fornecer o serviço de RCA, por sua vez, é qualificada como Tecnologia de Emissões Negativas (NET, do inglês *Negative Emissions Technology*) (FUSS *et al.*, 2014, 2018; MINX *et al.*, 2018; SMITH *et al.*, 2016; TANZER; RAMÍREZ, 2019).

2.4.1.1 Tecnologias de emissões negativas

Cada NET atua a partir de uma rota específica para transferência carbono da atmosfera para os reservatórios inferiores. Há estudos na literatura científica, como os de Smith *et al.* (2016) Fuss *et al.* (2018), que listam possíveis NETs, detalhando suas lógicas de fornecimento do serviço de RCA, assim como seus potenciais e custos. A Figura 2-6 esquematiza algumas das principais NETs investigadas com

⁷ Os trabalhos que fazem menção a esse serviço em língua inglesa utilizam a expressão *Carbon Dioxide Removal*, cuja sigla é CDR (KELLER *et al.*, 2018; KÖBERLE, 2019; VAN VUUREN *et al.*, 2018). Em português, contudo, a sigla CDR é utilizada em estudos na área de meio ambiente e mitigação de mudança climática para se referir a “Combustíveis Derivados de Resíduos”, utilizados sobretudo como fonte alternativa de energia para o setor de cimento (SNIC, 2019). Para evitar o uso da mesma sigla, este trabalho propõe o uso do acrônimo RCA para fazer referência ao serviço de emissões negativas em língua portuguesa.

relação a suas rotas de intervenção sobre o ciclo do carbono. Na sequência do texto, são apresentadas descrições sucintas destas rotas para cada NET.

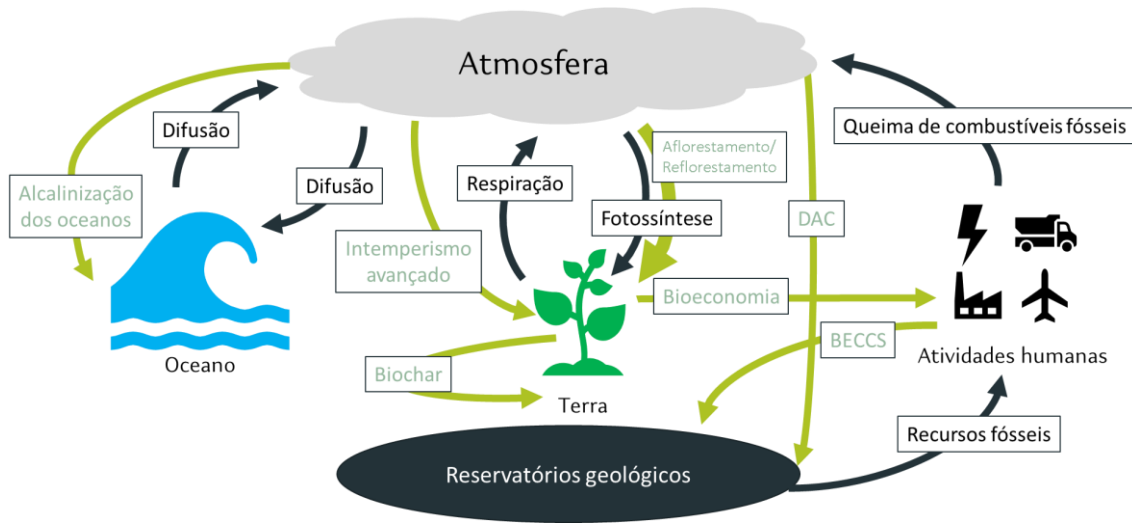


Figura 2-6. Esquematização de algumas das principais NETs e suas atuações sobre o ciclo do carbono para fornecimento de RCA

Fonte: Elaboração própria

2.4.1.1.1 Aflorestamento e reflorestamento

Trata-se da tipologia mais elementar de NET, que utiliza o plantio de árvores para remover carbono da atmosfera. Para tanto, faz uso rota da fotossíntese para remoção do CO₂ da atmosfera e incorporação do carbono na biomassa das árvores. Aflorestamento refere-se ao plantio de árvores em regiões que não abrigavam florestas em tempos recentes, enquanto o reflorestamento dá-se em regiões recentemente desmatadas, sendo um limiar temporal de aproximadamente 50 anos definidor da diferença de qualificação do terreno para a atividade (FUSS *et al.*, 2018).

A prática é a que apresenta menos custos diretos e sofisticação tecnológica dentre as principais tipologias de NETs. Além disso, pode representar cobenefícios locais para a qualidade do ar, dos recursos hídricos e mesmo da biodiversidade, a depender do tipo de plantio conduzido (BUSTAMANTE *et al.*, 2014; ÜRGEVORSATZ *et al.*, 2014). Seu potencial, contudo, é limitado à disponibilidade de áreas para o crescimento de florestas, que muitas vezes podem competir com outros usos da terra. Além disso, a manutenção do estoque de carbono requer que as

florestas sejam conservadas ou manejadas de forma adequada, o que pode requerer mecanismos de supervisão e controle, representando possíveis riscos e custos ocultos ao serviço de RCA (FUSS *et al.*, 2018; KÖBERLE, 2019; RATHMANN; SCHAEFFER; RAJÃO; SZKLO; VINHOZA; NOGUEIRA; LUCENA; MARCOLINO; SILVA; *et al.*, 2021; ROCHEDO *et al.*, 2018; VAN VUUREN *et al.*, 2018).

2.4.1.1.2 BECCS e DAC

A bioenergia com captura de CO₂ (BECCS, do inglês *Bioenergy with CO₂ Capture and Storage*) e a captura direta do ar (DAC, do inglês *Direct Air Capture*) são duas NETs baseadas na cadeia de Captura, Uso e Armazenamento de CO₂ (CCUS, do inglês *CO₂ Capture, Utilization and Storage*). Porém, diferentemente do caso aplicado a fontes fósseis, os sistemas de BECCS e DAC utilizam o carbono da atmosfera como fonte original. Assim, ao realizarem o armazenamento geológico permanente do CO₂ no fim de suas cadeias produtivas, as tecnologias provisionam serviço de CDR (SMITH *et al.*, 2016).

A diferença essencial entre BECCS e DAC está na forma com que a captura do CO₂ da atmosfera é realizada. No sistema DAC, a captura de CO₂ ocorre por meio de máquinas, que admitem um determinado fluxo de ar atmosférico para promover reações químicas seletivas entre o CO₂ diluído com um reagente alcalino, usualmente hidróxido de cálcio. O ar pobre em CO₂ é devolvido à atmosfera e o CO₂ é separado do reagente, gerando uma corrente gasosa de alta pureza do gás. A corrente de CO₂ é então encaminhada para o armazenamento geológico, enquanto o reagente recuperado retorna ao processo para um novo ciclo de captura de CO₂ do ar (BUI *et al.*, 2018; BUTNAR *et al.*, 2020; HONG, W. Y., 2022)

No caso dos sistemas de BECCS, a captura de CO₂ do ar é feita pela fotossíntese das plantas, que incorporam o carbono em sua biomassa. A biomassa é então submetida a algum processo de aproveitamento energético que gera CO₂, usualmente queima ou conversão a biocombustíveis. O CO₂ gerado na bioenergia é então capturado, seguindo uma cadeia similar à do CCUS fóssil (ver seção Controle de emissões de CO₂, no Apêndice B) (BUI *et al.*, 2018, DA SILVA *et al.*, 2018, MINX *et al.*, 2018, SMITH *et al.*, 2016).

Na comparação entre os dois sistemas, o DAC leva desvantagem em termos dos requisitos de energia. A demanda de energia em processos de separação está fundamentalmente associada à concentração do soluto (ROCHEDO, 2011). Assim, ao separar o CO₂ diretamente do ar, cuja concentração é de aproximadamente 0,041%, o sistema DAC requer muito mais energia que o BECCS, cujos processos de separação de CO₂ geralmente encontram correntes com concentrações entre 1% e 33% (US GAO, 2022). Além disso, o fato de o BECCS ser acoplado a um sistema de bioenergia faz dele um sistema de RCA com produção líquida de energia (FUSS *et al.*, 2018). A conveniência dos sistemas de DAC em relação ao BECCS está na flexibilidade geográfica de sua instalação, podendo ser virtualmente instalado em qualquer ponto do planeta em que seja possível capturar o ar da atmosfera (US GAO, 2022). Enquanto isso, os sistemas de BECCS requerem sua instalação em locais onde há produção de bioenergia, que muitas vezes é distante de sítios de armazenamento. A logística para transporte do CO₂ pode inviabilizar as operações, já que muitas vezes representa custos elevados ou requer o desenvolvimento de infraestruturas de redes dutoviárias complexas, com processos de regulação morosos para definições de regras para diversos atores envolvidos (BRASIL, 2017, COSTA, Isabella, 2014, DA SILVA *et al.*, 2018, ROCHEDO, 2011).

Junto com o aflorestamento/reflorestamento, os sistemas de BECCS e DAC são consideradas as principais rotas para fornecimento de RCA em trajetórias de longo prazo para descarbonização (ALELUIA REIS; TAVONI, 2023; IPCC, 2022a; KÖBERLE, 2019). A principal limitação mencionada para o potencial dos sistemas de BECCS está na necessidade de expansão da bioenergia que vem a reboque, o que pode representar maiores demandas por terra e água para culturas energéticas, potencialmente resultando em impactos sobre a segurança alimentar da população e a biodiversidade (FERROUKHI *et al.*, 2015; IPCC, 2018; VAUGHAN *et al.*, 2018). Já para a cadeia de DAC, os custos e requisitos de energia são usualmente identificados como os principais gargalos (FUSS *et al.*, 2018; SMITH *et al.*, 2016), mas a oferta de reagentes químicos também pode ser uma importante restrição (MAIA, 2021).

2.4.1.1.3 Bioeconomia

A bioeconomia pode ser definida como a produção, utilização, conservação e regeneração de recursos biológicos, incluindo o conhecimento, ciência, tecnologia e inovação associado, visando a provisão de soluções sustentáveis para e através de todos os setores da economia e a transformação para uma economia sustentável (IACGB, 2020). Portanto, ao incluir a possibilidade de conversão de matéria vegetal em insumos e produtos para a economia, a bioeconomia pode contribuir com a provisão de RCA pela produção de alguns produtos duráveis. Assim, é possível traçar um paralelo entre o CCU fóssil com a bioeconomia, no sentido da incorporação do carbono em cadeias produtivas (ZANON-ZOTIN *et al.*, 2023).

Um caso particular é a produção de biomateriais⁸, como por exemplo bioplásticos. Os bioplásticos incorporam em sua estrutura o carbono oriundo da matéria vegetal que lhe deu origem. Assim, podem proporcionar o serviço de RCA. Porém, é fundamental avaliar o ciclo de vida desses materiais para contabilizar o potencial de emissões negativas que eles podem proporcionar (DE OLIVEIRA, *et al.*, 2020; DE OLIVEIRA; ANGELKORTE; *et al.*, 2021; DE OLIVEIRA; ZANON-ZOTIN; *et al.*, 2021).

2.4.1.1.4 Biochar

A produção do biochar aparece como uma das mais promissoras NETs na literatura (FUSS *et al.*, 2018; WOOLF *et al.*, 2010). O biochar é um produto sólido de aspecto parecido com o carvão, com alto teor de carbono fixo, sendo produzido pelo processo de pirólise lenta da biomassa. Se utilizado como combustível ou agente redutor na siderurgia, o produto é classificado como carvão vegetal. Entretanto, se empregado para fins não energéticos, o produto é classificado como biochar. Dado que o biochar contém um elevado conteúdo de carbono e uma taxa de decomposição muito baixa, há aplicações do produto que proporcionam o serviço de RCA (LEHMANN; JOSEPH, 2009; WOOLF *et al.*, 2010).

⁸ O conceito de biomateriais varia entre diferentes áreas do conhecimento. Neste caso, biomateriais referem-se a materiais carbonáceos produzidos industrialmente a partir de fontes de biomassa.

A principal aplicação considerada para o biochar é como condicionante de solos para a agricultura. Há na literatura uma série de evidências apontam benefícios da aplicação do biochar para a qualidade do solo agrícola. Dentre esses benefícios, pode-se destacar a elevação do conteúdo de carbono, a redução da acidez, o aumento da capacidade de troca catiônica, a redução da lixiviação de nitrogênio, o aumento da retenção de água e o suporte à microbiota. Com isso a aplicação de biochar tem o potencial de proporcionar ganhos na produtividade agrícola (FUSS *et al.*, 2018; LATAWIEC *et al.*, 2019; LEHMANN; JOSEPH, 2009; MAIA, C. M. B. DE F.; MADARI; NOVOTNY, 2011; NOVOTNY *et al.*, 2015; SMITH *et al.*, 2016; STEINER *et al.*, 2007; WOOLF *et al.*, 2010).

Outro importante campo de aplicação considerado para o biochar é na recuperação de áreas degradadas, particularmente por processos de mineração. Peltz e Harley (2016) destacam que as principais propriedades do biochar para a recuperação de áreas degradadas são o pH, o conteúdo de carbono e as capacidades de retenção de água e troca catiônica. Evidências apontam ganhos significativos de qualidade para solos degradados em estudos de caso de recuperação ambiental com biochar (ANAWAR *et al.*, 2015; FELLETT *et al.*, 2011; FESTIN *et al.*, 2018; PAGE-DUMROESE *et al.*, 2018; PELTZ; HARLEY, 2016).

Assim, de forma geral, o serviço de RCA provido pelo biochar é avaliado qualitativamente, como um cobenefício para sua finalidade específica de aplicação. E, apesar de seu potencial, o biochar também ainda é pouco considerado em estudos de modelagem de trajetórias de longo prazo para descarbonização: dos modelos de avaliação integrada (IAM, do inglês *Integrated Assessment Model*) considerados no AR 6 do WG 3 do IPCC (2022a), apenas um IAM global (MERGE-ETL) e um nacional (Swiss TIMES Energy Systems Model) incluem a representação do biochar explicitamente. Portanto, a inclusão da representação dessa NET em mais IAMs considerando aplicações variadas para provisão do serviço de RCA pode apresentar novas possibilidades de caminhos para a descarbonização.

2.4.1.1.5 Intemperismo avançado e alcalinização dos oceanos

O intemperismo avançado e a alcalinização dos oceanos são NETs que objetivam majorar fluxos de carbono da atmosfera para os reservatórios inferiores

quimicamente, por meio de aplicações extensivas de rochas alcalinas sobre a terra e os oceanos (MINX *et al.*, 2018; SMITH *et al.*, 2016). O intemperismo avançado realizado pela cominuição de rochas alcalinas, como o dunito e o basalto, seguido pelo seu espalhamento sobre largas porções de terra. A cominuição e o espalhamento aumentam o contato entre as rochas e o ar, acelerando o processo de mineralização do CO₂ diluído na atmosfera que o intemperismo proporciona ao longo do tempo (STREFLER *et al.*, 2018).

A alcalinização dos oceanos é uma técnica de espalhamento de rochas alcalinas em mares, buscando a elevação de seu pH. Essa alteração química da água do mar aprimora a absorção de carbono da atmosfera pelos oceanos, ao mesmo tempo em que auxilia na reversão da tendência de aumento da acidez dos oceanos. Da mesma forma que o intemperismo avançado, a prática da alcalinização dos oceanos mimetiza de forma acelerada o processo natural de lixiviação de rochas alcalinas para os oceanos fruto de intempéries (GONZÁLEZ; ILYINA, 2016; ILYINA *et al.*, 2013; LENTON *et al.*, 2018).

Os sistemas de intemperismo avançado apresentam evidências limitadas de cobenefícios, com possíveis melhorias no aporte de nutrientes e na qualidade do solo, a depender do tipo de rocha empregado (STREFLER *et al.*, 2018). Para a alcalinização dos oceanos, evidências apontam que ela pode ser benéfica para conter o impacto da acidificação sobre os ecossistemas marinhos (GONZÁLEZ; ILYINA, 2016; ILYINA *et al.*, 2013). Por outro lado, ambas as práticas apresentam riscos de gerar poluição do ar, da terra e de corpos hídricos, além requer aumento de atividades de mineração para obtenção das rochas alcalinas (MINX *et al.*, 2018).

Assim como o biochar, essas NETs são pouco exploradas em trajetórias de longo prazo para descarbonização. Estudos também avaliam um potencial relativamente menor para essas práticas em relação a outras NETs (FUSS *et al.*, 2018; SMITH *et al.*, 2016). Devido aos cobenefícios limitados, é improvável que o intemperismo avançado possa ser implementado sem que haja um sistema que valora o serviço de RCA prestado. Já a alcalinização dos oceanos pode vir a ser implementada em função de pressões sobre uma agenda não diretamente associada à mitigação da mudança climática, com a finalidade primária de controlar a

acidificação de oceanos. Sendo assim, o serviço de RCA poderia ser considerado um cobenefício.

2.4.1.2 Emissões negativas em trajetórias de longo prazo para descarbonização

Conforme já mencionado, emissões negativas são o que permite a neutralização do acúmulo de GEE na atmosfera induzido pelos seres humanos, mesmo com um nível residual de emissões de origem antrópica. Isso significa a maior parte dos caminhos de longo prazo que conduzem a emissões líquidas zero necessitam de NETs para compensar seu balanço de emissões residuais de GEE (FUSS *et al.*, 2014; KÖBERLE, 2019).

Emissões residuais de GEE são particularmente relevantes em razão da existência de setores cuja descarbonização completa de suas atividades é extremamente desafiadora. Tais setores são usualmente denominados “setores de difícil abatimento”. Incluem, por exemplo, as indústrias de cimento e siderurgia, nas quais parte das emissões provêm de reações químicas que ocorrem no processo produtivo (emissões de processo), que, portanto, não são eliminadas pela substituição de energia fóssil por renováveis. Mesmo essa substituição muitas vezes requer alterações substanciais nos processos industriais, trazendo a necessidade de investimentos de capital elevados e arriscados para os conservadores agentes do setor (DAFNOMILIS; DEN ELZEN; VAN VUUREN, 2023). Outros segmentos tipicamente de difícil abatimento estão no setor de transportes, incluindo os modais marítimo e aéreo e os transportes terrestres para cargas pesadas e por longas distâncias. Diferentemente dos serviços de transporte de passageiros em veículos leves, em que o avanço da eletrificação da frota global avança francamente em alguns importantes centros de consumo (IEA, 2019; THRONSEN, 2022), nos segmentos de difícil abatimento a eletrificação se mostra difícil pela natureza do serviço prestado, que requer uma densidade de carga superior ao que as tecnologias atuais de baterias podem oferecer (ÇABUKOGLU *et al.*, 2018, 2019).

Assim, a existência dos setores de difícil abatimento auxilia na compreensão da necessidade da adoção de NETs para o alcance de emissões líquidas de GEE nulas. Entretanto, um outro conceito chave também é relevante para o entendimento do papel do RCA no nível do aquecimento global: os orçamentos de carbono. O nível

de aumento da temperatura do planeta é função do acúmulo de GEE na atmosfera. Portanto, cada patamar de aquecimento está associado a um nível de estoque de GEE na atmosfera. Logo, a diferença do estoque de GEE atual e o estoque associado a um patamar superior de aquecimento representa o quanto a humanidade deverá emitir para que esse patamar seja alcançado. Essa diferença de estoques é convencionalmente denominada de “orçamento de carbono” na literatura especializada. Assim, quanto menor o nível de aquecimento pretendido, menor é o orçamento de carbono associado (IPCC, 2018; KRISHNAN *et al.*, 2022; WALKER *et al.*, 2021).

A perspectiva do orçamento de carbono traz ainda mais relevância para as emissões negativas, já que elas proporcionam compensação de parte das emissões de GEE antrópicas, prolongando o período de duração do orçamento de carbono associado às metas mais estritas. Contudo, sua maior importância está na capacidade de as emissões negativas, em tese, poderem proporcionar um saldo líquido negativo de emissões de GEE pela humanidade, o que possibilitaria o retorno a um patamar inferior de aquecimento global. Assim, metaforicamente, o serviço de RCA poderia “pagar a dívida de carbono temporária”, possibilitando que se o nível de aquecimento eventualmente superasse as metas acordadas, pudesse retornar ao patamar desejado posteriormente. A expressão *overshoot* é empregada para representar esse processo de avanço e retorno dos níveis de aquecimento global (FUSS *et al.*, 2014; JARRAUD; STEINER, 2012; ROGELJ *et al.*, 2015).

Muitos resultados de IAMs utilizam-se do expediente de *overshoot* para apontar trajetórias de longo prazo viáveis de estabilização do aquecimento global em níveis condizentes com o Acordo de Paris, particularmente para 1,5°C. No SR 1.5 do IPCC dos 90 cenários de IAMs consistentes com um nível de aquecimento de 1,5°C, apenas 9 apontavam trajetórias sem *overshoot*, com 44 apresentando caminhos com *overshoot* de até 0,1°C e os demais 33 com *overshoot* de até 0,4°C (IPCC, 2018). Contudo, a construção de políticas de planejamento de longo prazo baseada em trajetórias com *overshoot* é um tema contencioso. Do ponto de vista físico, questiona-se a viabilidade do retorno da temperatura global após sua ultrapassagem dos níveis acima de 1,5°C, sobretudo diante do risco aumentado de atingimento de

pontos de não retorno nos ecossistemas, capazes de levar a processos de feedback de emissões de GEE (MÜLLER-CASSERES; CUNHA, 2020; NOBRE *et al.*, 2016; PATTYN *et al.*, 2018). Outrossim, admitir a possibilidade de *overshoot* também pode ser considerado um problema ético transgeracional, transferindo para as gerações vindouras não apenas os impactos da mudança do clima, como também o fardo da ação climática (LOMAX *et al.*, 2015; SYMONS; KARLSSON, 2015; WORKMAN *et al.*, 2020). Não obstante, o AR 6 do IPCC aponta uma probabilidade de 50% de haver um *overshoot* de até 0,3°C em cenários com estabilização do aumento da temperatura global até 2100 (IPCC, 2022a).

A controvérsia acerca do *overshoot* estende-se naturalmente ao elemento que, em tese, viabiliza o fenômeno, ou seja, às emissões negativas. Nesse sentido, argumenta-se que a dependência do desenvolvimento de NETs põe em xeque os objetivos do Acordo de Paris, dado que o crescimento projetado nas trajetórias de longo prazo é incompatível com o nível atual de maturidade tecnológica e com taxas realistas para sua implementação (BUTNAR *et al.*, 2020; FUSS *et al.*, 2014; KÖBERLE, 2019; LENTON *et al.*, 2018; LOMAX *et al.*, 2015; VAN VUUREN *et al.*, 2018; WORKMAN *et al.*, 2020). Além disso, a possibilidade de emissões negativas compensatórias abre espaço nos orçamentos de carbono para mais emissões fósseis (ALELUIA REIS; TAVONI, 2023; GAMBHIR *et al.*, 2019). Isso pode ser usado como argumento para enfraquecer discursivamente a urgência do encerramento da queima de combustíveis fósseis.

De todo modo, a transição do século XXI para a descarbonização da economia requererá fortemente serviços de RCA, como reconhece o AR 6 do IPCC (IPCC, 2022a). No relatório, as trajetórias de mitigação que levam à estabilização da temperatura em 1,5°C até o fim do século XXI requerem, em maior ou menor medida, a implementação de NETs. A quantidade de RCA necessária varia principalmente em função do grau de *overshoot* que haverá: a mediana das trajetórias sem *overshoot* (ou com uma quantidade bem limitada) aponta um requisito de RCA equivalente a 220 Gt de CO₂ acumulados até 2100, enquanto a mediana das trajetórias com *overshoot* mais intenso eleva o requisito para 380 Gt de CO₂ (IPCC, 2022a).

O reconhecimento da relevância do RCA e de sua valoração deverá criar importantes mercados para emissões negativas ao longo do século XXI. Alguns sinais já dão evidências disso, tais como os créditos fiscais para sistemas de DAC anunciados pelos EUA em agosto de 2022, no âmbito do *Inflation Reduction Act*, no valor de US\$ 180 por tonelada métrica de CO₂ permanentemente estocada (IEA, 2023b). No mercado privado também há sinais de valoração do serviço de RCA, como é o caso da empresa norte-americana Nori, que lançou um marketplace⁹ para compra de créditos de remoção de carbono emitidos por fazendeiros que realizam práticas de agricultura regenerativa em suas propriedades, sequestrando carbono no solo. Em consulta realizada no site em outubro de 2023, o custo do serviço de RCA equivalente a uma tonelada de CO₂ foi de US\$ 20 (NORI, 2023). Tais sinais apontam uma grande oportunidade para inovações de sistemas baseados em NETs.

2.4.2 Transição justa para a indústria do carvão mineral

2.4.2.1 A mudança climática e o mundo do trabalho

A crise ambiental e climática sobrepõe-se a um contexto de grande crise social no mundo. O aumento da desigualdade observado nas últimas décadas foi agravado pela pandemia de COVID-19, com os trabalhadores ganhando uma parcela cada vez menor do PIB global (ILO, 2022; ROSEMBERG, 2010). Com isso, as tendências distributivas no longo prazo e instabilidade em preços de alimentos e de energia periclitam a vida de milhões de pessoas no mundo (ROSEMBERG, 2010). Por outro lado, a capacidade de suporte do planeta é cada vez mais pressionada pelos níveis de consumo dos seres humanos. O Global Footprint Network traz anualmente um indicador simplificado de pegada ecológica, denominado “Dia de Sobrecarga da Terra”, que marca o dia em que a demanda por recursos naturais supera a capacidade do planeta suprir ou renovar tais recursos no curso de 365 dias (WWF

⁹ O funcionamento do marketplace da Nori inicia-se com o cadastro dos projetos dos fazendeiros no sistema da empresa. Os projetos são avaliados por uma entidade certificadora independente externa, que gera os créditos para os projetos de acordo com a quantidade aferida de CO₂ removido. Cada token gerado equivale à remoção de uma tonelada de CO₂ da atmosfera, sendo rastreável por tecnologia blockchain. Os tokens são voluntariamente comprados diretamente pelo sistema da empresa por pessoas físicas ou empresas que desejem abater suas próprias emissões e financiar os projetos de RCA. Não há mercados secundários para os tokens, ou seja, os créditos vencem no momento de sua compra.

BRASIL, 2023). Em 2023, em dois de agosto foi o Dia de Sobrecarga da Terra, significando que a o atual nível de consumo pela humanidade corresponde à capacidade de suporte de 1,75 planetas Terra. E, como mostra a Figura 2-7, há uma clara tendência de antecipação do Dia de Sobrecarga da Terra ao longo do tempo (GLOBAL FOOTPRINT NETWORK, 2023).

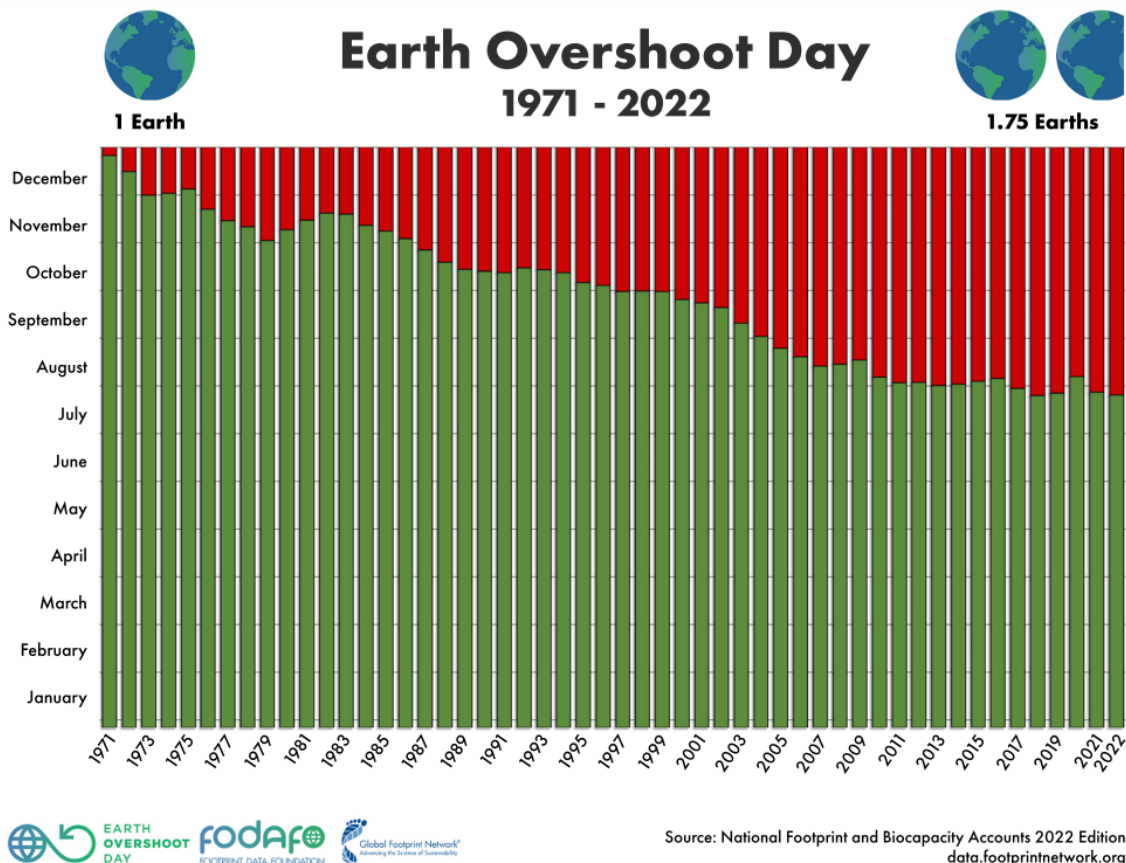


Figura 2-7. Evolução histórica do Dia de Sobrecarga da Terra

Fonte: Global Footprint Network (2023)

Apesar das pressões do nível de consumo global de recursos, cerca de 3 bilhões de pessoas no mundo ainda carecem de acesso a fontes modernas de energia ou tecnologias para cocção e aquecimento residencial, mais de 800 milhões de pessoas vivem em situação de insegurança alimentar e mais de um milhão não tem acesso a fontes seguras de água (SHARMA; KUMAR, 2020). Entretanto, é justamente a população que menos consome e pressiona a capacidade de suporte planetária que apresenta a maior vulnerabilidade à mudança do clima (IPCC, 2022b; RIAHI *et al.*, 2017).

Assim, mudanças climáticas mostram as profundas conexões existentes entre o desafio ambiental e a ordem social e econômica. Suas soluções, portanto, não devem ser buscadas de forma individualizada, mas integrada às agendas de desenvolvimento econômico e social. No passado, muitas negociações climáticas foram conduzidas por um viés de posicionamento da questão climática de forma antagônica ao desenvolvimento da economia (MASLIN, 2020; PRASAD; SUD, 2021; ROSEMBERG, 2010). Stern (2007) apontou de forma pioneira a racionalidade econômica de longo prazo do investimento em mitigação, afirmando que o custo de combater mudanças climáticas para limitar a concentração de CO₂ na atmosfera a 500 – 550 ppm equivaleria a cerca de 1% do PIB global até 2050, ao passo que o custo da inação seria de 5 a 20% do PIB global. Isso despertou grande interesse científico sobre o tema, abrindo espaço para a publicação de diversos estudos posteriores tratando sobre o tema do “custo da inação climática” (HORNSEY; FIELDING, 2020; MUKHEIBIR, 2013; SANDERSON; O’NEILL, 2020).

Contudo, a análise apenas do ponto de vista de projeções de longo prazo para o indicador agregado macroeconômico mostrou-se pouco convincente para motivar governos à ação. De acordo com Rosemberg (2010), as negociações climáticas têm maior potencial de repercutir em ações governamentais se forem desenvolvidas de forma integrada às prioridades domésticas. Entre estas prioridades, um dos temas centrais é a questão do trabalho.

A mudança climática tende a afetar o mundo do trabalho por diferentes frentes. Eventos extremos afetam a rotina dos trabalhadores em geral, causando dificuldade de locomoção e impossibilidade de funcionamento de determinadas atividades, como o turismo (ARABADZHYAN *et al.*, 2021; SEMENZA; EBI, 2019). Efeitos crônicos, como aumento do nível do mar e mudanças em padrões de pluviosidade, também alteram a dinâmica da produção e do emprego, particularmente na agricultura (GREGORY; INGRAM; BRKLACICH, 2005; MARENCO *et al.*, 2020; ZULLO; PEREIRA; KOGA-VICENTE, 2018). A maioria das regiões do mundo tende a ser negativamente afetada, apesar de possíveis ganhos de produtividade agrícola em algumas poucas zonas temperadas (IPCC, 2022b).

Nesse sentido, a adaptação às mudanças climáticas pode impactar positivamente o mundo do trabalho de diferentes formas. Primeiramente, a adaptação pode evitar a perda de empregos pelo efeito direto das mudanças climáticas, por exemplo permitindo que uma região continue viável para a agricultura mesmo sob um novo regime climático. Uma outra forma é fazendo com que as ações de adaptação criem empregos para preparar o país para enfrentar as mudanças climáticas, particularmente no setor de infraestrutura. Além disso, dado que a pobreza é o principal fator associado à vulnerabilidade às mudanças do clima, a criação de postos de trabalho visando a adaptação por si só gera renda para as famílias, aumentando seus meios próprios de proteção contra os impactos climáticos. Com isso, cria-se um ciclo virtuoso de melhora na resiliência da população (ROSEMBERG, 2010).

Portanto, é importante que planos nacionais de adaptação considerem a questão de impactos em empregabilidade como parte integrante de seu processo de construção. Para tanto, o planejamento das ações pode utilizar como critério de priorização a criação de postos de trabalho decorrentes tanto dos trabalhos associados ao desenvolvimento dos sistemas de adaptação, quanto da intensidade de mão-de-obra dos setores-alvo das ações (DA SILVA *et al.*, 2022; ROSEMBERG, 2010).

Nesse sentido, a descarbonização é complementarmente importante, pois tende a reduzir os esforços necessários para a adaptação e prover mecanismos de reforço sinérgico entre as ações (LUCENA *et al.*, 2018). Contudo, as ações para a descarbonização da economia tendem a apresentar uma miríade mais complexa de impactos sobre o mundo do trabalho. Rosemberg (2010) aponta cinco impactos diretos destas ações:

- (i) Criação de oportunidades de trabalho em novas cadeias produtivas. Por exemplo, na produção de H₂ e CCUS;
- (ii) Substituição de postos de trabalhos entre setores compatíveis. Por exemplo, operadores de atividades de petróleo *offshore* tornando-se operadores de produção de energia eólica *offshore*;

- (iii) Eliminação de trabalhos. Por exemplo, na geração termelétrica fóssil, refino de petróleo e, principalmente, na mineração de carvão;
- (iv) Transformação e redefinição de trabalhos existentes. Por exemplo, setores industriais passando a fornecer materiais para tecnologias limpas ou serviços para eficientização do uso de energia e recursos; e
- (v) Deslocamento geográfico de postos de trabalho, como consequência de possíveis “vazamentos de carbono”. Por exemplo, um operador com experiência em refino perde o emprego em seu país, diante do fechamento de seu posto de trabalho, e é contratado para trabalhar em um outro país com menor nível de compromisso climático.

Evidências apontam que a indústria renovável é, em média, mais intensiva em mão-de-obra que o seu correlato fóssil (IRENA; ILO, 2022). Isso faz com que haja potencialmente um saldo positivo em termos de números de postos de trabalho com os esforços de descarbonização. Nesse sentido, Krishnan *et al.* (2022) estimam que até 2050 a transição energética global para uma economia de emissões líquidas nulas gerará 200 milhões de empregos diretos e indiretos em novas cadeias de valor, ao passo que 185 milhões de postos de trabalho deixarão de existir.

Apesar do possível saldo positivo em número de empregos, alguns pontos relevantes sobre essa transição devem ser observados. Um deles diz respeito ao escopo espaço-temporal da transição, ou seja, onde e quando serão criados os novos empregos e eliminados os antigos. A depender da trajetória, isso pode ser um vetor de agravamento das desigualdades regionais. Outro aspecto relevante é o risco de distribuição assimétrica dos custos associados às ações de mitigação, que deve ser repartido entre os cidadãos de acordo com suas devidas possibilidades de contribuir e responsabilidade histórica sobre a causa do problema. Por fim, a inflexibilidade da mão-de-obra para a troca de setores entra como uma possível restrição à transição, seja pelo lado da mobilidade dos trabalhadores, seja pelo risco de indisponibilidade de recursos humanos para operar novos paradigmas de setor de energia (ROSEMBERG, 2010). Tais elementos põem a questão de justiça no centro das discussões sobre a transição energética.

2.4.2.2 Transição justa e seus desafios

O uso original do termo “transição justa” remete à década de 1970, no contexto em que trabalhadores do sindicato associado às indústrias petrolífera, química e atômica dos EUA temiam o prospecto de fechamento de diversas indústrias no país em virtude de questões de natureza ambiental, visto que uma lei federal aprovava um grande fundo com milhões de dólares para remediação de áreas contaminadas, porém sem prever recursos para compensar os trabalhadores afetados. A reivindicação por uma transição justa veio pela figura do líder sindical Tony Mazzochi, propondo que os trabalhadores aceitassem o fechamento das fábricas poluidoras, desde que o governo financiasse um esquema de provisão de salários, retreinamento e auxílio à recolocação profissional para os profissionais impactados, assim como auxílio financeiro e assistência técnica para o desenvolvimento de indústrias alternativas no lugar das poluidoras (CIPLET; HARRISON, 2020; GAMBHIR; GREEN; PEARSON, 2018).

Com a emergência do problema da mudança climática e da necessidade de descarbonização, os atores industriais associados às cadeias de combustíveis fósseis apropriaram-se do conceito de Mazzochi (GREEN, F.; GAMBHIR, 2020). Os prospectos de rápida redução do uso dos recursos fósseis, apesar de positivos da perspectiva do clima, apontam para riscos de perdas abruptas de empregos na cadeia de energia fóssil. Isso pode ser particularmente danoso para regiões economicamente dependentes dessas cadeias, sobretudo das atividades de extração dos recursos, que frequentemente apresentam poucas oportunidades para as quais os trabalhadores podem se recolocar profissionalmente. Como resultado, esses impactos tendem a ocorrer de forma concentrada nessas regiões, podendo causar grandes prejuízos sobre a qualidade de vida dos indivíduos e das comunidades envolvidas. Isso pode ter um resultado de enfraquecimento do apoio às ações pela descarbonização, provenientes de movimentos reativos dos impactados, o que pode dificultar sua implementação em um ritmo condizente com a urgência requerida (CARLEY *et al.*, 2018; CIPLET; HARRISON, 2020; GAMBHIR; GREEN; PEARSON, 2018).

Assim, no âmbito da transição energética justa do século XXI, a definição que vem sendo empregada para o conceito pela Organização Internacional do Trabalho (ILO, do inglês *International Labour Organization*), sendo também mencionada no AR6 do IPCC, é a de um conjunto de princípios, processos e práticas voltadas a garantir que nenhuma pessoa, trabalhador, lugar, setor, país ou região seja deixado para trás nas mudanças em prol de uma economia de baixo carbono (ILO, 2015; IPCC, 2022a; REID; LIEUW-KIE-SONG, 2022; REIMERS, 2022). Tal conceito inclui as noções de bem-estar, equidade e justiça, reconhecendo o caráter disruptivo da transição dos sistemas energéticos e a necessidade de intervenção para que as economias dependentes da indústria fóssil não sejam afetadas desproporcionalmente.

O arcabouço da transição justa é um pacote de propostas de políticas públicas orientadas a diferentes aspectos de vulnerabilidade dos trabalhadores e comunidades, como: incertezas sobre impactos no trabalho, riscos de perda de trabalhos, riscos de processos de decisão não democráticos, riscos de desaceleração econômica regional ou local, dentre outros. De acordo com Rosemberg (2010), esse arcabouço deve incorporar, ao menos, as seguintes políticas:

- (i) Expressivos investimentos em tecnologias e setores intensivos em mão-de-obra e de baixa emissão,
- (ii) Pesquisa e avaliação preliminar de impactos sociais e empregatícios,
- (iii) Diálogo social e consulta democrática de atores setoriais e parceiros sociais,
- (iv) Treinamento e desenvolvimento de habilidades,
- (v) Proteção social, e
- (vi) Análise local e planos de diversificação econômica.

No centro dos debates sobre transição justa está a indústria carbonífera, que entre as cadeias fósseis é a que apresenta a maior vulnerabilidade perante as ações para descarbonização (CARLEY *et al.*, 2018; SNYDER, 2018). Essa vulnerabilidade afeta especialmente as regiões economicamente dependentes das atividades de mineração, visto que as alternativas de empregos substitutos no setor

de energias renováveis ficam geralmente longe dessas localidades (SPENCER *et al.*, 2018). Além disso, também há impactos sobre a gestão pública nessas localidades, visto que o orçamento dos governos locais geralmente é planejado com a previsão das receitas oriundas dessas atividades, como royalties e impostos. Com isso, o encerramento das atividades de mineração também representa uma possível redução da oferta de serviços públicos nessas regiões (LECOCQ *et al.*, 2022).

Para além dos problemas sociais, há também a questão dos ativos afundados, que representam os bens que perdem seu valor econômico em cenários de descarbonização. No caso da indústria carbonífera, há essencialmente duas classes de ativos afundados. Uma são os investimentos em infraestrutura, como instalações de mineração ou plantas termelétricas que, diante de restrições de emissões de GEE, ficam impedidas de operar. A outra são as reservas de carvão, cujo aproveitamento econômico também fica impossibilitado em cenários de descarbonização. De acordo com McGlade e Ekins (2015), em cenários de restrição do aquecimento global em até 2°C, cerca de 88% das reservas provadas de carvão do mundo não poderão ser queimadas sem tecnologias de CCS. Isso representa riscos de uma “bolha de carbono” para o mercado financeiro (GAMBHIR; GREEN; PEARSON, 2018).

2.4.2.3 Caminhos de transição justa para a indústria do carvão

Apesar do quadro desafiador, a literatura apresenta alguns casos bem-sucedidos no sentido da transição justa. Gambhir *et al.* (2018) revisam alguns desses casos, apontando algumas características comuns das trajetórias percorridas:

- (i) Implementação antecipada das estratégias e políticas, permitindo um declínio industrial em um ritmo planejado, acompanhado de uma visão de longo prazo de apoio ao surgimento de novas indústrias;
- (ii) Colaboração e diálogo entre governos centrais e locais, entidades empresariais e sindicato, permitindo um processo juridicamente seguro e o comprometimento dos principais atores envolvidos na mudança;
- (iii) Existência de mecanismos de proteção social, como garantias de salários, pensões, benefícios de saúde e programas de aposentadoria antecipada, de forma a mitigar as perdas econômicas dos trabalhadores no curto prazo;

- (iv) Investimento público e privado em infraestrutura e capacitação para trabalhadores afetados e no estabelecimento de indústrias alternativas para prevenir o declínio industrial no médio prazo; e
- (v) Investimento público e privado em educação e inovação, para apoiar novas indústrias que possam contribuir para a prosperidade e o crescimento regional no longo prazo.

Isso ressalta a importância de uma política industrial adequada para moldar os caminhos de uma transição justa. Gambhir *et al.* (2018) mencionam a existência de duas tipologias de políticas industriais para a transição justa: as de natureza reativa e as proativas. As políticas reativas são voltadas ao auxílio dos trabalhadores dos setores impactados negativamente pela transição. Já as políticas proativas visam a maximização dos benefícios de longo prazo da transição, o que inclui, por exemplo, o apoio a mudanças em empresas com atividades de alto para baixo carbono. Uma boa prática para o planejamento da transição justa é combinar políticas reativas, para as metas de curto prazo, com políticas proativas, para os objetivos de longo prazo (BRIDLE *et al.*, 2017). Tal estratégia garante o suporte imediato para as comunidades afetadas, facilitando o trânsito das estratégias de descarbonização dentro de um horizonte temporal coerente com a urgência da transição. Ao mesmo tempo, cria caminhos de saída para essas economias no longo prazo, com atividades adequadas a uma sociedade futura de baixo carbono. A existência desses caminhos de saída faz-se relevante para evitar a dependência permanente dessas economias das políticas sociais de bem-estar, o que pode semear futuras tensões políticas e sociais (RODRÍGUEZ-POSE, 2018).

2.4.2.3.1 O caso da transição energética justa na região do Ruhr, Alemanha

Galgóczi (2014) traz uma importante revisão do caso da transformação da região do vale do rio Ruhr, localizada no estado da Renânia do Norte Vestfália, Alemanha, desde uma economia fundamentada nos setores siderúrgico e carbonífero para uma economia baseada em conhecimento e serviços. O caso da *Ruhrgebiet* é considerado um modelo de transição energética justa (DIEESE, 2021; GAMBHIR; GREEN; PEARSON, 2018).

O pico da atividade siderúrgica e carbonífera na região do Ruhr ocorreu ainda na década de 1950. Contudo, até a década de 1970 ainda havia políticas de apoio para essas atividades na região. O apoio político a essas atividades industriais, na visão de Galgóczi (2014), decorria de um processo de trancamento com três dimensões essenciais: econômica, institucional e cognitiva. O trancamento econômico era fruto da monoestrutura econômica da região, que a tornava excessivamente dependente da indústria do carvão e aço. O trancamento institucional referia-se ao fato de que uma coalizão de empregadores, políticos e sindicatos tinha um interesse compartilhado na preservação das estruturas existentes. Já o trancamento cognitivo ocorria porque os atores locais relutavam em aceitar que a crise da região era estrutural, em vez de cíclica.

A grande característica da transição no vale do Ruhr é a condução da mudança da estrutura de empregos na região, feita de forma muito bem planejada e coordenada. Traduzindo em números o desafio associado ao declínio da indústria do carvão na região do Ruhr, houve uma redução de 473.000 trabalhadores em 1957 para apenas 11.448 até o final de 2013 e, em última instância, para zero até o final de 2018 (GALGOCZI, 2019).

Para enfrentar esse desafio, a região implementou um conjunto coordenado de medidas, incluindo acordos de negociação coletiva, programas de redistribuição de trabalho e aposentadorias antecipadas. Em 1993, as partes envolvidas assinaram um acordo abrangente, que garantia uma abordagem socialmente responsável para o programa de reestruturação. Esse acordo incluía a renúncia a aumentos salariais pelos trabalhadores e a introdução de um programa de redistribuição de trabalho. O mecanismo de aposentadoria antecipada, estabelecido em 1972, também foi importante no processo de redução do número de empregos ao longo do tempo (GALGÓCZI, 2014).

Além disso, um acordo específico foi negociado em 2012 para lidar com o fechamento da indústria do carvão do Ruhr até o final de 2018. Esse acordo incluía um plano de compensação social específico. A Sociedade de Treinamento Vocacional do Carvão do Ruhr foi estabelecida para gerenciar as transições do mercado de trabalho, usando um mapeamento de demanda de habilidades para

estabelecer objetivos e desenvolver projetos-modelo. Cada trabalhador afetado também pôde contar com a formulação de uma estratégia individual de recolocação profissional, desenvolvida em cooperação com o governo regional, a administração da empresa e os conselhos de fábrica.

Em termos da mudança de orientação industrial, Galgóczi (2014) destaca que ela partiu inicialmente das grandes empresas de carvão e aço, como a RAG e a Thyssen-Krupp, que reconheceram o caráter estrutural da tendência de declínio industrial na região. Assim, elas diversificaram seus negócios em setores como engenharia de plantas, tecnologia ambiental e serviços de controle. Paralelamente, as autoridades locais mudaram o foco de sua política industrial para o desenvolvimento tecnológico em meio-ambiente e inovação. Foram também estabelecidos centros de transferência de tecnologia para apoiar e oferecer serviços a empreendedores na região.

O destaque da estratégia de reindustrialização no Vale do Ruhr, conhecida como "neointustrialização," está na área de tecnologia ambiental. Essa competência surgiu das indústrias locais de carvão e aço, que buscavam constantemente maneiras inovadoras de reduzir a poluição que geravam. Devido a regulamentos ambientais rigorosos e à demanda por tecnologias limpas, a região acumulou expertise em contrapor danos ambientais, tornando-se um centro de referência na Alemanha para tecnologias ambientais. Esse cluster industrial gerou uma quantidade considerável de empregos na região, com cerca de 100.000 pessoas empregadas nesse setor até meados da década de 2000, integrando empresas locais com universidades e institutos de pesquisa (GALGÓCZI, 2014).

O Ruhr também se destacou nas áreas de fornecimento de energia e eliminação de resíduos. Impulsionada pelo *know-how* das indústrias incumbentes em lidar com resíduos em grandes quantidades, a pesquisa em recursos renováveis, reciclagem e incineração de resíduos foi estimulada desde as primeiras fases da transição (GALGÓCZI, 2014).

A transição da região ocorreu para além dos limites da produção industrial, envolvendo também marcantes projetos urbanísticos e culturais. Um dos destaques é

o complexo industrial Zollverein, na cidade de Essen, construído no início do século XIX como a maior e mais moderna mina de carvão do mundo. Atualmente, o complexo Zollverein é listado como Patrimônio Mundial da Humanidade pela UNESCO e abriga o museu do Ruhr, sendo um importante destino turístico na região (Figura 2-8).



Figura 2-8. *Zeche Zollverein*, um símbolo da transição energética justa na região do Ruhr, Alemanha

Fonte: Acervo pessoal

O estudo de caso da região do Ruhr destaca a importância da colaboração entre governo, municípios, empregadores e sindicatos para uma transição justa bem-sucedida. Também mostra que uma visão clara para o futuro, apoiada por um amplo conjunto de políticas industriais, é essencial. Como regra nas transições energéticas (SMIL, 2016), a transformação estrutural do vale do Ruhr levou décadas para se concretizar. Isso enfatiza a necessidade de um planejamento adequado, pois o tempo é um recurso limitado quando se trata da ação contra a mudança climática.

3 A indústria carbonífera no Brasil

3.1 Características do setor energético brasileiro

O setor energético brasileiro apresenta características peculiares em relação ao de outros países, sendo marcado por uma elevada presença relativa de energias renováveis em seu mix de fontes primárias. Em 2022, 47,4% da oferta de energia interna no país veio de fontes renováveis. Em comparação, a média de participação de energias renováveis em 2020 foi de 14,1% no mundo e de 11,5% nos países da OCDE (EPE, 2023). A abundância de potencial energético advindo de recursos naturais renováveis moldou a história do desenvolvimento da matriz energética brasileira, muito antes da pauta climática ter relevância na agenda de discussões globais.

No setor de combustíveis, por exemplo, o Brasil apresenta elevada participação de biocombustíveis para os transportes. Isso faz com que a fração de energia renovável consumida na matriz de transportes do Brasil seja superior à média global. Por exemplo, em 2019, mais de 25% da energia utilizada no setor de transportes brasileiro veio de fontes renováveis, ao passo que na média global os transportes utilizaram quase 90% de energia fóssil no mesmo ano (EPE, 2021a; IEA, 2020). Isso é produto de importantes pacotes de estímulos realizados para o desenvolvimento das cadeias de biocombustíveis no Brasil, particularmente do etanol e do biodiesel.

O Brasil foi pioneiro no desenvolvimento em larga escala da cadeia do etanol para motores veiculares leves. Motivado pelo choque do petróleo no início da década de 1970 e as possíveis implicações que a dependência externa poderia ter sobre a segurança energética nacional, o governo da época decidiu envidar esforços para buscar soluções domésticas para o abastecimento do mercado interno de combustíveis líquidos veiculares. Assim, decidiu-se pelo lançamento de um programa de políticas públicas para criação de uma cadeia baseada em etanol da cana-de-açúcar, o chamado Programa Nacional do Álcool (Proálcool). O Proálcool incluiu ações sobre toda a estrutura produtiva, visando promover a produção e o consumo do etanol. Pelo lado da produção, houve políticas de estímulo à expansão

do cultivo da cana-de-açúcar e investimentos em destilarias para conversão do açúcar da cana em etanol. Já pelo lado da demanda, as políticas implementadas apoiaram o desenvolvimento de motores veiculares adaptados para o uso de etanol e a conversão da frota de veículos leves com motores a gasolina em motores a etanol. Mais recentemente, com o desenvolvimento dos motores flex-fuel nos anos 2000, capazes de operar sob qualquer proporção de mistura de etanol com gasolina, houve novos esforços políticos bem-sucedidos para conversão da frota veicular a esses novos motores (COELHO *et al.*, 2006; GOLDEMBERG *et al.*, 2004; GOLDEMBERG; COELHO; GUARDABASSI, 2008; HORTA NOGUEIRA *et al.*, 2013; SOCCOL *et al.*, 2010; SOVACOOOL, 2016).

Ainda no setor de combustíveis, inspirado no sucesso do Proálcool, o país lançou um programa similar para o estímulo da produção de biodiesel no início da década de 2000, o Programa Nacional de Desenvolvimento Tecnológico de Biodiesel (Probiodiesel). As ações do Probiodiesel foram implementadas com foco maior no estímulo à produção do combustível. Pelo lado do consumo, ao invés dos esforços para desenvolvimento de motores adaptados e conversão da frota, o Probiodiesel propôs o estabelecimento de mandatos de mistura minoritária de biodiesel ao óleo diesel fóssil. O programa propôs mandatos com teores mínimos de biodiesel, progressivos ao longo do tempo, desde que dentro de um limiar tecnicamente viável para a queima da mistura nos motores a diesel convencionais, sem a necessidade de adaptação. Diferente do Proálcool, o Probiodiesel foi planejado em um contexto no qual o tema da mudança climática já estava posto na agenda de discussões globais. Sendo assim, uma das justificativas para o Probiodiesel foi a redução da pegada de carbono no consumo do diesel no Brasil. Entretanto, o desenvolvimento social no campo foi a principal justificativa para o lançamento do programa, no sentido da criação de um mercado de grande escala para que agricultores familiares pudessem plantar espécies oleaginosas e vendê-las como insumo de óleo vegetal para a produção de biodiesel (CANTARELLA *et al.*, 2015; CAVALETT; ORTEGA, 2010; CREMONEZ *et al.*, 2014; LUCENA, A. F. P. *et al.*, 2009; RATHMANN; SZKLO; SCHAEFFER, 2010, 2012).

O setor elétrico também contribuiu significativamente para a alta participação de renováveis no mix energético do Brasil, apresentando papel de destaque no mundo quanto ao uso de fontes renováveis de energia. Fontes renováveis foram responsáveis por 87,9% dos 690 TWh de eletricidade gerada no Brasil em 2022, enquanto a média da participação de renováveis na geração elétrica no mundo foi de 26,6% em 2020 e nos países da OCDE foi de 30,8%, em 2021 (EPE, 2023). Isso se dá pela grande capacidade instalada de usinas hidrelétricas, eólicas e solares, além das termelétricas a biomassa. Dessa forma, as fontes fósseis têm baixa participação relativa na geração elétrica no Brasil, sobretudo o carvão mineral. Em 2022, apenas 2,1% da eletricidade brasileira foi gerada em termelétricas a carvão, ao passo que no mundo as usinas a carvão mineral geraram 35,4% da eletricidade no mesmo ano (ENERGY INSTITUTE, 2023; EPE, 2023).

O desenvolvimento do setor elétrico brasileiro foi inicialmente impulsionado pelo aproveitamento do grande potencial hidráulico existente nas bacias hidrográficas do país. A base do sistema elétrico brasileiro foi desenvolvida ao longo do século XX com a construção de usinas hidrelétricas, sobretudo dos empreendimentos de grande porte e com grandes reservatórios comissionados a partir da década de 1970. Para integrar o potencial hidráulico das diferentes regiões do país, visando o aproveitamento da complementariedade existente entre os diferentes regimes hídricos, os empreendimentos de geração foram gradualmente integrados entre si por linhas de transmissão de energia elétrica. Em 1998, formalizou-se a criação de um Sistema Interligado Nacional (SIN), consolidando a integração da extensa e complexa rede de transmissão de eletricidade no país. Juntamente com a instituição do SIN, foi criada a figura do Operador Nacional do Sistema (ONS), instituição que detém a autorização para coordenar as atividades de geração e transmissão de energia elétrica no Brasil (ANEEL, 2022).

À medida em que, paralelamente, a cadeia sucroenergética foi crescendo para atender o mercado automotivo com etanol, verificou-se a disponibilidade cada vez maior de um importante recurso energético, o bagaço da cana-de-açúcar, ora considerado um resíduo do processo. O aproveitamento energético do bagaço foi continuamente sendo integrado à produção do etanol, com sua queima em caldeiras

fornecendo vapor para suprir as demandas do processo, tanto de energia térmica quanto de energia elétrica. Ao passo que caldeiras mais eficientes foram empregadas na produção de etanol, verificou-se que a oferta de eletricidade gerada pelo bagaço de cana-de-açúcar poderia exceder consideravelmente as demandas internas da usina. Ademais, a safra e o respectivo processamento da cana-de-açúcar que dá origem ao bagaço no Centro-Sul do Brasil coincide com o período mais seco do ano, denotando um potencial de complementariedade da oferta do recurso com o regime hidrológico da região. Com isso, o bagaço de cana-de-açúcar foi continuamente integrado ao portfólio de geração elétrica no Brasil, sobretudo a partir dos anos 2000, de forma que o sistema elétrico passou a ser considerado como tendo uma base hidrotérmica (ANEEL, 2022; GOLDEMBERG; COELHO; GUARDABASSI, 2008; GOLDEMBERG; TEIXEIRA COELHO, 2004; HORTA NOGUEIRA *et al.*, 2013; NETO; SZKLO; ROCHEDO, 2021; SCHAEFFER *et al.*, 2012; VALENTIM BASTOS *et al.*, 2022; VIVIESCAS *et al.*, 2019).

Os movimentos mais recentes de expansão da matriz elétrica brasileira foram no sentido da diversificação para outras fontes renováveis, nomeadamente a energia eólica e a energia solar. O desenvolvimento da energia eólica no Brasil resultou inicialmente da implementação do Programa de Incentivos às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), que foi seguido por bons resultados de projetos eólicos em leilões de energia (DUTRA, 2007; DUTRA; SZKLO, 2008; LUCENA, J. D. A. Y.; LUCENA, 2019; SANTA CATARINA, 2022). O Proinfa também estimulou a entrada de projetos de energia solar fotovoltaica centralizada no mix de geração do SIN, porém em escala consideravelmente inferior à fonte eólica. O grande incentivo ao aumento de capacidade instalada de energia solar no Brasil veio com a promulgação da Resolução Normativa 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que regulamentou as atividades de mini e microgeração de energia elétrica, possibilitando que um grande número de pequenos consumidores pudessem investir em sistemas de geração própria (ANEEL, 2012; EPE, 2023).

Em função dessa estrutura, o setor energético brasileiro apresenta um baixo perfil de emissões de GEE em comparação a outros países do mundo. Por exemplo, para cada unidade de energia disponibilizada no Brasil, são emitidos em média

26%, 33% e 51% de GEE a menos do que nos países europeus da OCDE, nos EUA e na China, respectivamente. Para o setor elétrico, a diferença é ainda mais acentuada: enquanto os países europeus da OCDE, EUA e China emitem, em média, cerca de 252, 358 e 692 kg de CO₂eq/MWh, respectivamente, cada MWh gerado no Brasil em 2022 emitiu, em média, apenas 62 kg de CO₂eq (EPE, 2023).

Outra peculiaridade do Brasil é a de ser um importante produtor agropecuário global, o que proporciona elevadas emissões de GEE, particularmente metano. Ademais, o país possui uma grande extensão territorial de florestas, abrigando a maior parte do bioma amazônico, fazendo com que o desmatamento tenha grande peso sobre o perfil de emissões do país. Isso somado a um setor energético com baixas emissões relativas leva o perfil de emissões brasileiros a uma condição *sui generis* dentre as grandes economias do mundo, em que o setor de AFOLU prepondera sobre os setores energético e industrial (KÖBERLE *et al.*, 2020; NOBRE *et al.*, 2016; ROCHEDO *et al.*, 2018). A Tabela 3.1 apresenta o perfil de emissões de GEE do Brasil em 2020.

Tabela 3.1. Perfil setorial das emissões de GEE do Brasil em 2020, em toneladas de GEE

Setores	Emissões totais ¹	Contribuição setorial	Gases de efeito estufa					
			CO ₂	CH ₄	N ₂ O	PFC	HFC	SF ₆
Energia	390	23,2%	367	12,6	10,0	-	-	-
IPPU ²	102	6,1%	92,5	0,80	0,36	0,24	7,76	0,33
Agropecuária	478	28,5%	26,0	297	153	-	-	-
LULUCF ³	637	38,0%	596	27,9	12,9	-	-	-
Resíduos	69,6	4,2%	0,20	66,6	2,76	-	-	-
Total	1.676	100,0%	1.082	407	179	0,24	7,76	0,33

Notas:

1 – Em toneladas de CO₂eq, calculadas a partir da métrica GWP-100 do Segundo Relatório de Avaliação do IPCC.

2 – Emissões de Processos Industriais e Uso de Produtos (*Industrial Processes and Products Use*)

3 – Uso da Terra, Mudança de Uso da Terra e Florestas (*Land Use, Land Use Change and Forestry*). Emissões associadas principalmente ao desmatamento.

Fonte: Adaptado de Molleta *et al.* (2022)

Sendo assim, é possível concluir que a geração termelétrica a carvão tem baixo impacto sobre o perfil de emissões do Brasil, uma vez que a fonte representa apenas uma pequena parcela da energia elétrica gerada no país, ao passo que o sistema de energia também tem uma participação relativamente baixa nas emissões brasileiras de GEE totais. Por outro lado, isso implica que diferentemente de outros países, o *phase-out* da geração elétrica não abatida de carvão mineral no Brasil poderia

representar uma meta possivelmente simples de ser absorvida pelo setor elétrico, ao menos do ponto de vista técnico. Mesmo isso sendo uma meta pouco ambiciosa para o Brasil, incapaz de alterar substancialmente o perfil de emissões de GEE do país, anúncios de metas nacionais nesse sentido podem ser politicamente atraentes para o governo perante a comunidade internacional, alinhando o país às tendências globais modernas, conforme sinalizado no Pacto de Glasgow (UNFCCC, 2021). Isso põe em xeque as perspectivas futuras das atividades atuais indústria carbonífera brasileira, o que pode ser particularmente danoso do ponto de vista socioeconômico para determinadas regiões brasileiras em função do perfil desta indústria, abordado em mais detalhes na subseção 3.2.

3.2 O carvão mineral no Brasil

Apesar do pouco aproveitamento do recurso, o Brasil é um dos países com mais reservas de carvão mineral. De acordo com o Energy Institute (2023), o Brasil detinha 0,6% das reservas globais de carvão no ano de 2020, sendo o décimo quinto país com maiores reservas¹⁰. Contudo, na lista dos maiores consumidores no mesmo ano, o Brasil figurava apenas na vigésima oitava posição (ENERGY INSTITUTE, 2023). De acordo com a EPE (2023), as reservas medidas e indicadas¹¹ de carvão mineral em 2022 possuem um valor de equivalência energética de aproximadamente 7,0 bilhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep). Para fins de comparação com os demais combustíveis fósseis, as reservas provadas de petróleo e gás natural no Brasil possuem um equivalente energético estimado em 2,1 e 0,4 bilhões de tep, respectivamente¹² (EPE, 2023).

¹⁰ O Energy Institute utiliza a métrica de reserva provada de carvão para fazer essa comparação entre os países. Define-se a reserva provada como as quantidades que informações geológicas e de engenharia indicam com razoável certeza que podem ser recuperadas no futuro a partir de depósitos conhecidos sob as condições econômicas e operacionais existentes (ENERGY INSTITUTE, 2023).

¹¹ A EPE utiliza uma métrica para medida das reservas de carvão mineral em três níveis: reserva medida, reserva indicada e reserva inferida. A estimativa é baseada em resultados de campanhas exploratórias, em que o grau de certeza de cada nível se associa a uma determinada área que circunda os furos de sonda em que se verifica uma camada de carvão com espessura mínima de 0,5 a 1 m. As reservas medidas são formadas por uma área contígua aos furos e com 400 m de raio. As reservas indicadas incluem uma área de 1,2 km de raio dos furos de sonda, excluindo a área das reservas medidas. A área das reservas inferidas é formada por um raio de 4,8 km dos furos, descontada a área das reservas indicadas (EPE, 2023).

¹² A equivalência energética das reservas medidas e indicadas de carvão e das reservas provadas de petróleo e gás natural, utilizada pela EPE, é uma forma indicativa para comparação da magnitude do

Apesar dessa abundância de potencial energético, os recursos carboníferos concentram-se na região Sul do país. Dos cerca de 32 bilhões de toneladas de recurso carbonífero existentes no país, aproximadamente 90,1% estão no estado do Rio Grande do Sul, 9,6% em Santa Catarina e apenas 0,3% no Paraná (EPE, 2016). No que diz respeito à produção, contudo, o maior produtor é Santa Catarina, que produziu 6,1 milhões de toneladas de carvão ROM em 2022, contra 5,1 Mt e 0,3 Mt produzidas no Rio Grande do Sul e no Paraná, respectivamente (SIECESC, 2022).

Em termos de suas características, o carvão encontrado no sul do Brasil guarda similaridades petrográficas com outros carvões encontrados na África do Sul e na Índia, ao passo que diverge de carvões encontrados no Hemisfério Norte. Isso está associado ao período de sua formação, que ocorreu antes da separação do supercontinente Gondwana. Portanto, os carvões encontrados nessas localidades são denominados “gonduânicos”, tendo como característica comum a alta presença de material volátil e de cinzas em comparação com carvões norte-americanos e europeus (CHAVES, 2008).

Tais características dificultam o aproveitamento dos carvões para aplicações metalúrgicas. Sendo assim, o direcionamento para o mercado de geração termelétrica é o caminho de menor esforço para a indústria¹³. No caso do Brasil, desde a desregulamentação promovida na década de 1990, em que as compras compulsórias do carvão metalúrgico produzido em Santa Catarina foram suspensas, toda a demanda das coquearias é atendida por carvão metalúrgico importado. Assim, o carvão mineral produzido atualmente no Brasil é direcionado integralmente para aplicações energéticas, sobretudo para a geração termelétrica: em 2022, das 6,8 Mt de carvão nacional vendidas, mais de 85% foram direcionadas à geração termelétrica (SIECESC, 2022).

No que diz respeito à mineração de carvão no Brasil, há atualmente 15 minas ativas do Sul do país, operadas por 10 empresas, como mostra a Tabela 3.2. A

potencial energético dos diferentes recursos. Entretanto, é importante ressaltar que as métricas partem de abordagens diferentes.

¹³ Há tecnologias desenvolvidas no Brasil que permitiriam o aproveitamento de recursos carboníferos nacionais para aplicações metalúrgicas, porém estas nunca foram implementadas (CGEE, 2012; CHAVES, 2008).

maioria das empresas e dos empreendimentos de mineração fica Santa Catarina, porém o Rio Grande do Sul concentra o maior número de empreendimentos de grande porte.

Tabela 3.2. Empresas e número de minas de carvão em operação no Brasil

Estado	Empresas de mineração	Municípios	Porte das minas ¹				Total
			PP	P	M	G	
SC		Lauro Müller	0	0	2	1	3
	Metropolitana, Catarinense, Rio Deserto, Belluno, Siderópolis, Gabriella	Treviso	0	0	2	1	3
		Criciúma	1	0	0	0	1
		Içara	0	0	1	0	1
		Urussanga	0	0	1	0	1
RS	Copelmi, Companhia Riograndense de Mineração, Seival Sul	Candiota	0	0	0	2	2
		Arroio dos Ratos	0	0	0	1	1
		Cachoeira do Sul	0	0	1	0	1
		Minas do Leão	0	1	0	0	1
PR	Cambuí	Figueira	0	0	1	0	1
Total			1	1	8	5	15

Notas: 1 – Critério para os portes da produção: PP = Porte Micro: Produção de ROM de até 10.000 t/ano; P = Porte Pequeno: Produção de ROM entre 10.000 e 100.000 t/ano; M = Porte Médio: Produção de ROM entre 100.000 e 1.000.000 t/ano; G = Porte Grande: Produção de ROM maior de 1.000.000 t/ano.

Fonte: Elaborado com dados de ANM (2023b) e SIECESC (2022)

Pelo lado do uso, o Brasil conta com 11 plantas de geração termelétrica a carvão mineral em operação atualmente, listadas na Tabela 3.3, que totalizam uma potência instalada ligeiramente superior a 3,0 GW. As sete usinas localizadas na região Sul, portanto consumidoras de carvão nacional, somam 47% da capacidade total do parque de geração a carvão operante no Brasil. Com isso, os maiores centros consumidores do carvão nacional concentram-se em dois municípios. Um deles é Capivari de Baixo, localizado em Santa Catarina, que abriga o Complexo Termelétrico Jorge Lacerda. O outro município, Candiota, fica no Rio Grande do Sul, contemplando as plantas Candiota III e Pampa Sul.

Tabela 3.3. Usinas termelétricas a carvão mineral em operação no Brasil em 2023

Usina	Estado	Município	Potência (MW)	Data de entrada em operação
Jorge Lacerda IV	SC	Capivari de Baixo	330,00	01/02/1997
Jorge Lacerda III	SC	Capivari de Baixo	220,00	01/02/1979
Jorge Lacerda I e II	SC	Capivari de Baixo	190,00	01/03/1965
Candiota III	RS	Candiota	350,00	01/01/2011
Pampa Sul	RS	Candiota	345,00	28/06/2019
Figueira	PR	Figueira	20,00	01/01/1963
Alunorte ¹	PA	Barcarena	103,85	26/09/2007
Porto do Itaqui	MA	São Luís	360,14	05/02/2013
Alumar ¹	MA	São Luís	75,20	20/10/2009
Porto do Pecém I	CE	São Gonçalo do Amarante	720,27	01/12/2012
Porto do Pecém II	CE	São Gonçalo do Amarante	365,00	18/10/2013

Notas: 1 – Geradores de energia elétrica para autoprodução.

Fonte: Elaborado a partir dos dados de ANEEL (2023)

A maior parte da geração a carvão mineral nacional é subsidiada no Brasil por recursos da Conta de Desenvolvimento Energético (CDE). A CDE tem como um dos objetivos expressos na Lei nº 10.438/2002, que a instituiu, a promoção da competitividade da geração elétrica a carvão mineral nacional. Para isso, a CDE reembolsa o custo com combustíveis dos empreendimentos termelétricos que utilizam carvão nacional, que já estavam em operação até fevereiro de 1998 (CCEE, 2022). Com isso, as empresas controladoras do complexo Jorge Lacerda e das plantas Candiota III¹⁴ e Figueira recebem recursos da CDE para reembolsar seus custos com a compra de carvão nacional. A usina Pampa Sul, por sua vez, entrou em operação após a vigência do período estipulado pela lei em questão, não podendo requerer os recursos da CDE. Em 2022, os recursos da CDE referentes ao reembolso da compra de carvão nacional repassados às empresas donas de Jorge Lacerda, Candiota III e Figueira corresponderam a aproximadamente R\$ 827 milhões, R\$ 61 milhões e R\$ 2 milhões, respectivamente (CCEE, 2023b).

¹⁴ Mesmo tendo entrado em operação após fevereiro de 1998, a usina Candiota III tem direito a receber os recursos da CDE, pois a unidade integra um complexo termelétrico mais antigo, que entrou em operação em 1978 (HOFFMANN, 2013).

3.3 A perspectiva da indústria do carvão no Brasil para a transição justa

Assim como em outros lugares no mundo, as tendências de descarbonização preocupam os atores industriais associados ao setor carbonífero no sul do Brasil. O carvão mineral é considerado um recurso vital para a economia de alguns municípios da região, gerador de emprego e renda para a população local. Além disso, a atividade carbonífera configura um elemento marcante na história e na cultura das regiões com tradição mineira (BELOLLI; QUADROS; GUIDI, 2002). Portanto, a transição justa é um tema central nas discussões que envolvem o setor.

O DIEESE e o ICS realizaram um mapeamento em 2022 sobre os trabalhadores formais associados a cadeia da mineração e beneficiamento do carvão mineral em Santa Catarina e no Rio Grande do Sul (DIEESE, 2022). O diagnóstico aponta a existência de 3.607 trabalhadores envolvidos nesses setores no Brasil em 2019, com cerca de 70% localizados em Santa Catarina, 17% no Rio Grande do Sul e os demais no Paraná. Também é apontada uma tendência de queda no número de trabalhadores nos setores entre 2006 e 2019, conforme mostrado na Figura 3-1.

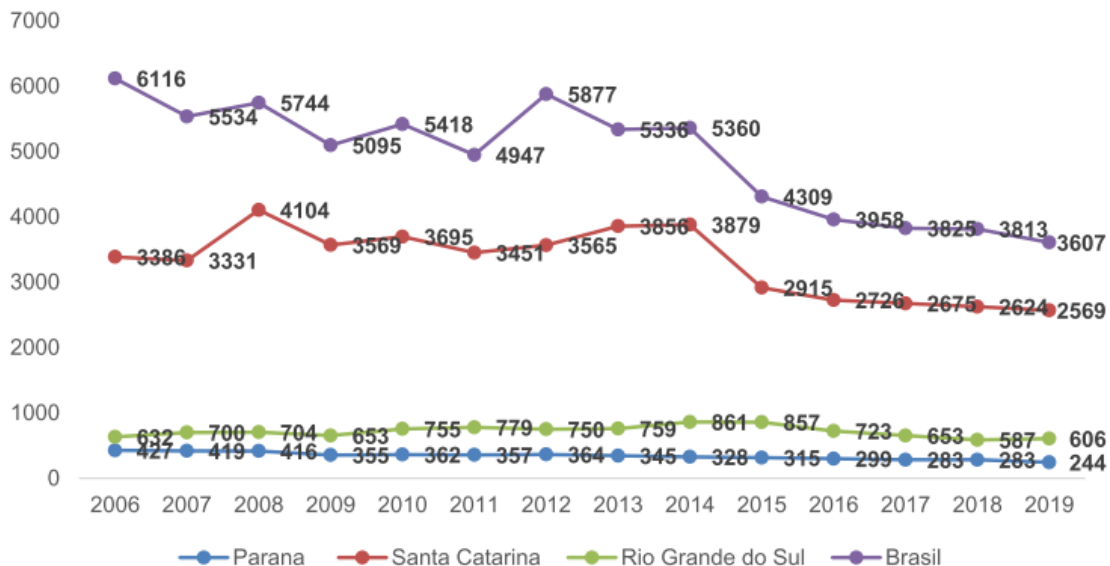


Figura 3-1. Série histórica do número de trabalhadores formais nos setores de mineração e beneficiamento do carvão mineral no sul do Brasil

Fonte: DIEESE (2022)

A bacia carbonífera de Santa Catarina, localizada no extremo sul do estado, é formada por 12 municípios (Balneário Rincão, Cocal do Sul, Criciúma,

Forquilha, Içara, Lauro Müller, Morro da Fumaça, Nova Veneza, Orleans, Siderópolis, Treviso e Urussanga). Destes, os municípios com maior número de pessoas empregadas são os de Treviso e Lauro Müller, onde se concentram, respectivamente, cerca de 42% e 39% dos trabalhadores na mineração e beneficiamento de carvão mineral do estado. Nesses municípios, o setor de extração de carvão mineral é o que gera mais vínculos empregatícios formais, além de apresentar remunerações acima da média de todos os setores. No caso de Treviso, em 2019 a extração de carvão concentrou 65,8% dos empregos formais do município, e o salário médio pago pelo setor foi de R\$ 3.858, contra uma média salarial de R\$ 3.399 no conjunto de todos os setores. Com relação às atividades no setor, a mineração emprega consideravelmente mais que o beneficiamento em Santa Catarina (96% contra 4%) (DIEESE, 2022).

As jazidas do Rio Grande do Sul localizam-se em dois polos carboníferos, a região da Campanha Gaúcha e o Baixo Jacuí. Candiota e Hulha Negra, onde está a maior parte da produção do estado, ficam no Polo Carboquímico da Região da Campanha, que congrega ainda outros 7 municípios (Aceguá, Bagé, Caçapava do Sul, Dom Pedrito, Lavras do Sul, Pinheiro Machado e Pedras Altas). Em 2019, o município de Candiota concentrou 74% dos trabalhadores da mineração e beneficiamento de carvão do Rio Grande do Sul. Contudo, diferentemente dos municípios catarinenses com maior atividade mineira, em Candiota a atividade de extração de carvão é apenas a terceira na lista dos setores com mais vínculos empregatícios formais. O setor com mais vínculos é a administração pública, seguido pela geração elétrica, em virtude da existência das plantas termelétrica na cidade. Contudo, logo após o setor de extração de carvão estão os setores de instalação e manutenção elétrica e de fabricação de cimento, ambos indiretamente associados também à cadeia do carvão¹⁵. Em termos de remuneração, o setor de extração de carvão paga em média um salário de R\$ 4.414 em Candiota, ao passo que a remuneração média na cidade é de R\$ 3.200. Por fim, diferentemente de Santa

¹⁵ No caso do setor de cimento, sua associação com o setor de carvão dá-se pelo uso comum das cinzas geradas nas termelétricas como adição ou material cimentício suplementar na composição da mistura que gera o cimento. Trata-se de uma medida de cunho econômico e ambiental, porquanto aproveita um resíduo de baixo valor para substituir o clínquer, um material mais caro de se produzir e com alta pegada de carbono (SNIC, 2019).

Catarina, no Rio Grande do Sul há uma distribuição mais equilibrada entre o número de trabalhadores da mineração e do beneficiamento do carvão mineral, que representam respectivamente 57% e 43% do total de empregos do setor (DIEESE, 2022).

Em termos de atividade econômica, o DIEESE estima que em 2019 o setor carbonífero gerou uma massa salarial mensal de cerca de R\$ 10 milhões, em Santa Catarina, e de R\$ 3 milhões, no Rio Grande do Sul (DIEESE, 2022). Além disso, o faturamento das empresas com a venda de carvão mineral totalizou R\$ 1,75 bilhão em 2022, dos quais 53% foram para empresas catarinenses e 44% para as gaúchas (SIECESC, 2022). As atividades mineiras também representam uma importante forma de arrecadação para o setor público da região, sobretudo da Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM). Em 2019, foram arrecadados R\$ 17 milhões de CFEM pela atividade de mineração, dos quais R\$ 10 milhões foram destinados aos municípios produtores, sobretudo para Treviso-SC (32%), Arroio dos Ratos-RS (16%) e Candiota-RS (14%) (ANM, 2023a).

Esse conjunto de dados mostra a importância socioeconômica do carvão mineral para as regiões mineiras no sul do Brasil, indicando um grande impacto socioeconômico local decorrente de uma eventual tomada de decisão em nível nacional no sentido da descontinuação repentina da atividade mineira. Nesse sentido, houve iniciativas para a promulgação de leis para a transição justa, tanto em nível local quanto nacional, particularmente tendo o estado de Santa Catarina como escopo. Em nível nacional, sancionou-se a Lei 14.299/2022, que instituiu o “Programa de Transição Justa (TEJ)”, incluindo a necessidade de elaboração de um Plano de Transição justa, ao passo que também prorrogou a outorga da concessão do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda até 2040, tido como o período de provável encerramento da geração termelétrica não abatida a carvão mineral (BRASIL, 2022). O Plano de Transição Justa foi publicado pelo governo federal em dezembro de 2022, propondo um conjunto de objetivos específicos, ações e iniciativas nos seguintes eixos:

- (i) Meio Ambiente;
- (ii) Desenvolvimento Territorial e Infraestrutura;

- (iii) Desenvolvimento Econômico;
- (iv) Ciência, Tecnologia e Inovação;
- (v) Social, bem-estar, trabalho, emprego e renda;
- (vi) Minas e Energia; e
- (vii) Governança.

Em nível local, o governo estadual de Santa Catarina também estabeleceu, por meio da sanção da lei nº 18.330/2022, uma Política Estadual de Transição Energética Justa e a criação do Polo de Transição Energética Justa do Sul do Estado de Santa Catarina, localizado na região carbonífera do estado. Para a implementação do polo, são instituídos dois programas específicos: o Programa de Transição Sustentável da Cadeia Produtiva do Carvão Mineral Sul de Santa Catarina (PROSUL/SC) e o Programa de Recuperação Ambiental de Áreas Degradadas do Polo de Transição Energética Justa do Sul do Estado de Santa Catarina (PRADSUL/SC) (GOVERNO DE SANTA CATARINA, 2022).

No escopo do PROSUL/SC, constam objetivos de formação e capacitação de recursos humanos, atração de novos investimentos e o planejamento e desenvolvimento de arranjos produtivos locais. Para este último objetivo, propõe-se o estímulo do desenvolvimento sustentável para os municípios do polo, com ênfase em ações de apoio a investidores e novas oportunidades de negócio (GOVERNO DE SANTA CATARINA, 2022), o que ressalta uma visão de reconhecimento do papel da inovação como caminho para a transição justa na região.

Em suma, o amplo uso do discurso de transição justa denota que os atores industriais vislumbram uma perspectiva de fim para o regime sociotécnico do carvão mineral¹⁶. Assim, no modelo de fases apresentado por Turnheim e Geels (2012) (Tabela 2.1), pode-se considerar que o atual contexto associado à indústria carbonífera no Brasil se encaixa na definição da fase 4, de declínio e

¹⁶ Somam-se a isso sinais do mundo empresarial, como a decisão da empresa ENGIE em vender no fim de 2021 sua participação acionária de 100% do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, tomada como forma de alinhamento à estratégia global da companhia de sair das operações a carvão mineral (ENGIE, 2021).

desestabilização. Isso requer esforços no sentido de reorientar ou mesmo recriar esse regime industrial, de forma a empregar suas capacidades e vantagens comparativas para outros fins, que possam ir além do mero propósito de gerar eletricidade. Mantendo a rota atual, o provável fim para o regime sociotécnico do carvão no sul do Brasil é a sua dissolução.

4 Propostas de sistemas não-convencionais para remoção de CO₂ da atmosfera por meio da indústria carbonífera

Neste capítulo, são propostas atividades alternativas para a indústria do carvão mineral, relacionadas à remoção de CO₂ da atmosfera. A proposta desses sistemas é baseada na compreensão de que, para alcançar a descarbonização da economia, é crucial eliminar a queima de carvão mineral não abatida, assim como é essencial adotar serviços de remoção de CO₂ da atmosfera, conforme indicam os principais estudos de longo prazo com IAMs e planejamento energético (consultar seção 2.4.1).

Nesse contexto, a indústria carbonífera, cujas atividades estão intrinsecamente vinculadas ao ciclo do carbono, poderia encontrar oportunidades em uma nova economia de baixo carbono, aproveitando essa relação de maneira inovadora. A ideia é que a indústria do carvão mineral, ao invés de ser uma emissora de carbono, torne-se uma removedora de carbono da atmosfera, invertendo o fluxo usual.

Para ilustrar essa perspectiva, pode-se recorrer à metáfora elaborada por Szklo e Schaeffer (2006), que retrata o petróleo como uma “Lança de Peleu” para a transição energética¹⁷. Na mitologia grega, Aquiles recebeu a lança mágica de seu pai, Peleu, feita de um freixo do Monte Pelion. Essa lança possuía a capacidade de curar as feridas que ela própria infligia, desde que fosse aplicada novamente sobre a ferida. Essa propriedade da lança foi demonstrada no caso do rei Télefo, que foi ferido por Aquiles em uma batalha e adquiriu uma ferida que não cicatrizava. Somente após Télefo procurar Aquiles novamente, que raspou pedaços da Lança de Peleu sobre sua ferida, é que ele finalmente encontrou a cura.

¹⁷ Neste artigo, Szklo e Schaeffer (2006) apresentam um ponto de vista sobre o papel do petróleo na transição energética de baixo carbono. Para os autores, uma visão de que a transição do século XXI em que fontes alternativas de energia substituem o petróleo é limitada e enviesada. É limitada pois não considera o setor energético como um sistema de cadeias integradas, para prover uma cesta divers de serviços, e enviesada por desconsiderar que muitas das barreiras ao desenvolvimento de fontes alternativas não vêm dos vícios do petróleo (escassez e externalidades ambientais), mas de suas virtudes (economias de escala e escopo e, principalmente, infraestrutura consolidada). Isso reforça um caminho para a descarbonização que não passa pela competição de fontes renováveis para substituir toda infraestrutura secular desenvolvida pela indústria do petróleo, mas sim pelo aproveitamento dessa infraestrutura em um processo com gradual redução. Com isso, é proposta a ideia de uma transição não para “fontes alternativas de energia”, mas para “sistemas alternativos de energia”.

No contexto da indústria do carvão mineral, podemos associar o carbono, ou a necessidade de descarbonização, à "Lança de Peleu". A descarbonização infligiu um ferimento grave que ameaça o fim dessa indústria. No entanto, a descoberta de atividades alternativas viáveis para remoção de carbono da atmosfera pode transformar essa necessidade de descarbonização em uma oportunidade para manter a indústria carbonífera viva. Essa metáfora sugere que, se a indústria do carvão mineral encontrar e implementar atividades alternativas viáveis para remover o carbono da atmosfera, poderá curar o ferimento causado pela descarbonização. Assim como Têlêfo buscou Aquiles novamente para obter os pedaços da Lança de Peleu e encontrar a cura, a indústria do carvão mineral pode se reinventar e encontrar soluções para evitar sua dissolução por meio da prestação de serviços essenciais para a descarbonização.

Portanto, a descoberta e a adoção de atividades alternativas relacionadas à remoção de carbono da atmosfera tornam-se uma rota possível para recriação da indústria do carvão mineral, com um novo propósito de prestar um serviço essencial no contexto da descarbonização. Ao transformar a necessidade de descarbonização em uma oportunidade de inovação, a indústria carbonífera pode encontrar maneiras de se adaptar e desempenhar um papel relevante na transição a uma economia de baixo carbono.

Nessa perspectiva, as seções subsequentes deste capítulo apresentam propostas inovadoras de sistemas para remoção de carbono da atmosfera, utilizando arranjos produtivos centrados na indústria do carvão. A seção 4.1 descreve a proposta de um sistema de produção de zeólitas de cinzas de carvão mineral para captura de CO₂ por adsorção na própria usina termelétrica fóssil geradora das cinzas, com o excedente de produção de zeólitas sendo direcionado para captura de CO₂ em usinas termelétricas a biomassa. Esse sistema é apresentado em maior nível de detalhamento, uma vez que foi o escolhido para aplicação em um estudo de caso no capítulo 5, dada a maior abundância de dados e ferramentas metodológica para sua análise. A seção 0 traz a descrição menos detalhada de outras duas propostas de sistemas inovadores. A primeira trata do uso do espaço e da infraestrutura de minas de carvão mineral deplecionadas para estocagem permanente de carbono na forma de *biochar*. A outra está relacionada à

captura de CO₂ associada ao coaproveitamento¹⁸ de biomassa com carvão mineral, com a proposta de que as emissões negativas sejam alocadas às cinzas geradas, com vista à formulação de cimentos Portland com pegada de carbono neutra ou mesmo negativa. Para os sistemas propostos na seção 0, recomenda-se que trabalhos futuros elaborem avaliações técnico-econômicas detalhadas com estudos de caso, tal qual é realizado nesta tese para o primeiro sistema proposto.

Vale ressaltar que os sistemas propostos não são as únicas formas de uso da indústria carbonífera para fornecimento de serviços de remoção de carbono da atmosfera. Porém, são sistemas alternativos e inovadores, com uma abordagem pioneira na literatura científica. Portanto, esta tese não se propõe esgotar as possibilidades para tais sistemas, mas contribuir com propostas possíveis para ampliar o escopo de possibilidades para proporcionar serviços de emissões negativas, considerando a transição justa como um elemento crítico.

¹⁸ Trata-se de um termo proposto para representar diferentes formas de aproveitamento conjunto de biomassa com carvão mineral, tais como a coqueima e a cogasificação.

4.1 Produção de zeólitas de cinzas de carvão mineral para captura de CO₂ com emissões negativas em termelétricas a biomassa

4.1.1 Revisão da literatura

4.1.1.1 Zeólitas: panorama histórico

Zeólitas são aluminossilicatos de metais alcalinos ou alcalinos terrosos, sobretudo sódio, potássio, magnésio e cálcio, que possuem importantes propriedades físico-químicas de interesse para aplicações diversas, dentro de processos químicos (LUZ, 1995). Ocorrem naturalmente em depósitos formados pela alteração hidrotérmica da lava vulcânica depositada, ou seja, pela reação com água em altas temperaturas (LUZ, 1995; RESENDE; MONTE; PAIVA, 2008; VIEIRA; RODRIGUES; MARTINS, 2014).

Seu pioneiro registro de reconhecimento data de 1756, quando o mineralogista Baron Axel Frederick Cronsted verificou um comportamento não usual do mineral: ao ser aquecido, ocorria uma exsudação de água em sua superfície. Por esse motivo, foi cunhado para o mineral o termo zeólita, proveniente dos verbetes “zeo” e “lithos”, que em grego significam “ferver” e “pedra”, respectivamente (FLANIGEN, 1991; LUZ, 1995; XU *et al.*, 2007).

Ao longo do século XIX, a Ciência avançou consideravelmente com uma série de descobertas das propriedades dos microporos zeólitas e, conseqüentemente, de suas potenciais aplicações enquanto adsorvente e trocador iônico (XU *et al.*, 2007). Entre essas descobertas, destacam-se as observações de Damour, em 1840, sobre a reversibilidade da desidratação dos cristais zeolíticos, que não causava alterações em sua morfologia ou transparência (FLANIGEN, 1991). A reversibilidade da troca iônica em zeólitas foi comprovada por Eichhorn, em 1858, após desbravada a ocorrência do fenômeno em solos, feita por Way e Thompson, em 1850. Friedel lançou em 1896 a ideia de zeólitas desidratadas como matrizes esponjosas abertas, ao observar a oclusão de líquidos orgânicos como etanol, clorofórmio e benzeno em zeólitas previamente desidratadas. Sua teoria ganhou força com as observações de Grandjean, em 1909, sobre a adsorção de amônia, hidrogênio, ar e outras moléculas em chabazita desidratada, culminando nos primeiros registros de um efeito de separação seletiva das zeólitas em nível molecular por Weigel e Steinhoff em 1925, após a verificação de uma rápida

adsorção seletiva de água, metanol, etanol e ácido fórmico em chabazita desidratada, que rejeitou a entrada de acetona, éter e benzeno. Tal efeito foi posteriormente cunhado de forma geral para sólidos porosos como “peneira molecular”, por McBain em 1932 (FLANIGEN, 1991).

A evolução nas caracterizações dos diferentes tipos e de propriedades das zeólitas naturais foi seguida por avanços na síntese de zeólitas artificiais, sobretudo a partir da mimetização dos processos naturais que levaram a formação das zeólitas. Dada a abundância dos materiais em formações geológicas sedimentares em zonas próximas à superfície da terra, concluiu-se que sua síntese ocorrera naturalmente a pressões e temperaturas moderadas. Assim, desenvolveram-se processos de síntese de zeólitas por reações hidrotermais em temperaturas próximas a 100 °C (entre 25 e 150 °C). O primeiro registro de síntese de zeólitas data da metade do século XIX, quando St. Claire Deville publicou a pioneira síntese hidrotérmica de levinita, em 1862 (FLANIGEN, 1991; MARGETA; FARKAŠ, 2020). Mas a história industrial das zeólitas sintéticas inicia-se apenas na década de 1940, marcada pelo pioneirismo na classificação de zeólitas com base nos tamanhos moleculares e na síntese da zeólita modernita, fruto dos trabalhos de Richard M. Barrer (MARGETA; FARKAŠ, 2020). Já em meados da década de 1950 passou-se a produzir zeólitas industrialmente, não apenas a modernita, mas também as de tipo A e X, NaY, chabazita, entre outras. O uso comercial de zeólitas beneficiou-se sobremaneira das descobertas de Donald W. Breck, Robert M. Milton e Thomas B. Reed (MARGETA; FARKAŠ, 2020), que proporcionaram diversas aplicações do produto na química industrial, tais como a catálise no refino de petróleo e na petroquímica, a purificação e separação de gases e operações de troca iônica (XU *et al.*, 2007).

Atualmente há registro de 176 tipos de zeólitas, de acordo com a sexta e mais recente edição do Atlas de Zeólitas, das quais cerca de 60 são de ocorrência natural e as demais sintéticas (MCCUSKER; OLSON; BAERLOCHER, 2007). Contudo, das zeólitas naturais apenas seis tipos são encontrados em depósitos com abundância, nomeadamente analcima, chabazita, clinoptilolita, erionita, modernita e phillipsita (LUZ, 1995; MARGETA; FARKAŠ, 2020; RESENDE; MONTE; PAIVA, 2008).

4.1.1.2 Características e aplicações das zeólitas

Do ponto de vista físico-químico, as zeólitas são estruturadas em redes cristalinas tridimensionais, compostas de tetraedros do tipo TO_4 (onde T é um metal alcalino ou alcalino terroso), unidos no vértice através dos átomos de oxigênio, que são as unidades primárias de construção (LUZ, 1995). A estrutura secundária das zeólitas pode conter arranjos com até 16 desses tetraedros básicos, ou ser formada pelo arranjo de estruturas poliédricas, como é o caso das zeólitas do tipo A, X e Y¹⁹ (LUZ, 1995). A Figura 4-1 ilustra, a título de exemplo, a estrutura de zeólitas A, X e Y.

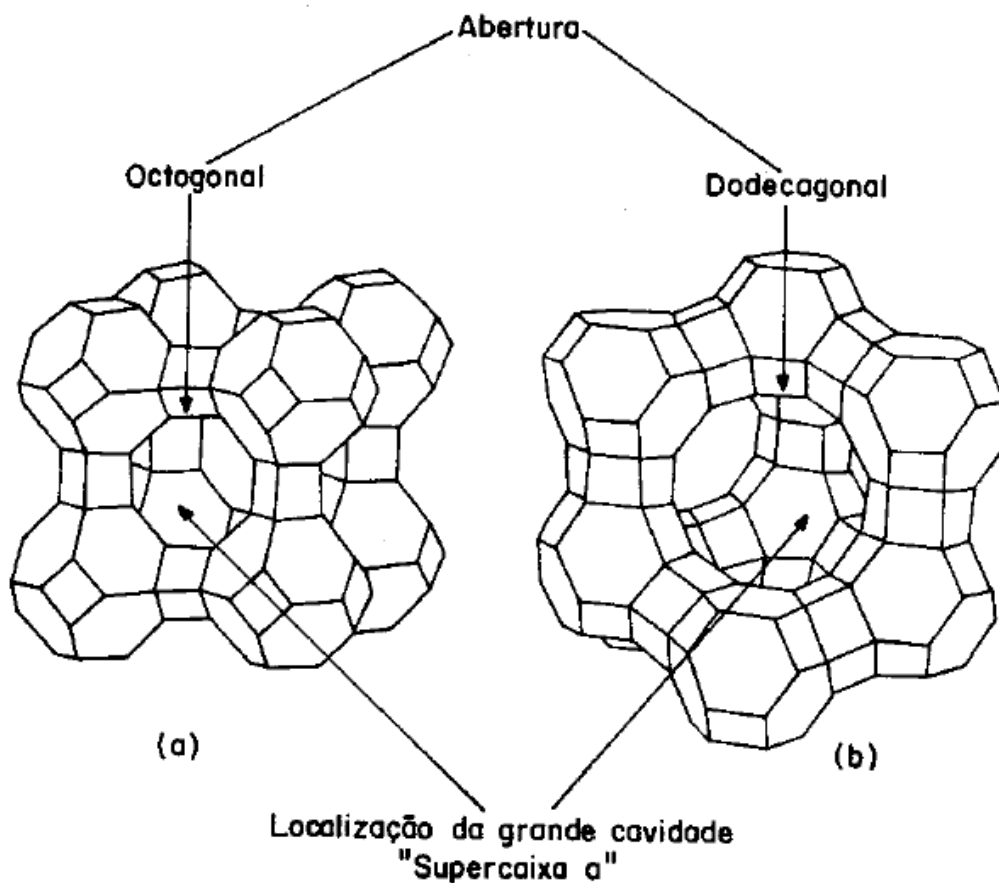


Figura 4-1: Estrutura de zeólitas com arranjo poliédrico – (a) A; (b) X ou Y

Fonte: Luz (1995)

Em materiais não porosos, apenas os átomos metálicos encontrados na superfície externa estão disponíveis para realizar o contato com as substâncias presentes no meio

¹⁹ As zeólitas X e Y, apesar da nomenclatura diferente, possuem estrutura semelhante, sendo diferenciadas somente pela razão Si/Al intrarreticular (LUZ, 1995).

para a ocorrência de reações químicas. Portanto, o aumento da área exposta para contato pode ser obtido pela cominuição das partículas, que chegaria um patamar próximo a uma exposição total dos átomos se atingida uma escala nanométrica de tamanho de partículas. Contudo, a obtenção deste nível de redução de tamanho de partículas por meio de processos físicos convencionais, como a moagem, é extremamente desafiadora do ponto de vista técnico, sobretudo no que tange o controle da modificação estrutural (VAN BEKKUM; FLANIGEN; JANSEN, 1991).

No caso das zeólitas, sua natureza porosa permite que as substâncias presentes no meio se difundam no interior das partículas, possibilitando o contato com os metais presentes em toda a estrutura cristalina do sólido, que servem de base para uma série de processos físico-químicos. Assim, a estrutura das zeólitas confere-lhes uma combinação de propriedades que as faz objeto de interesse científico particular em relação a outros materiais baseados em óxidos inorgânicos, a citar: o caráter microporoso com tamanhos de poros uniformes, permitindo a entrada seletiva de compostos orgânicos baseada no tamanho das partículas; a capacidade de desenvolver acidez interna, propiciando sítios ativos para catálise de reações orgânicas; as propriedades de troca iônica; e a elevada estabilidade térmica (VAN BEKKUM; FLANIGEN; JANSEN, 1991). Em razão dessas características, as zeólitas apresentam importantes aplicações comerciais consolidadas na indústria, para além de inúmeros usos potenciais ainda a serem explorados (RESENDE; MONTE; PAIVA, 2008).

Na ótica da aplicação comercial, as zeólitas sintéticas diferem das de ocorrência natural essencialmente em razão do grau de pureza e homogeneidade que a síntese controlada permite frente à formação natural dos sólidos. Em contrapartida, o processo de síntese de zeólitas é mais custoso, em geral, se comparado à lavra e beneficiamento simples de zeólitas naturais (RESENDE; MONTE; PAIVA, 2008). Desta sorte, as zeólitas sintéticas destinam-se majoritariamente a aplicações que requerem características superiores de qualidade, tais como a catálise heterogênea e a produção de detergentes. Por outro lado, zeólitas naturais costumam ser mais empregadas em aplicações de grande volume e menor requisito de qualidade, sobretudo nas áreas de construção civil, controle de poluição ambiental e agricultura (LUZ, 1995; MELO, 2013; MUMPTON, 1999; RESENDE; MONTE; PAIVA, 2008; XU *et al.*, 2007). Tal

diferenciação, no entanto, é meramente tendencial, havendo casos em que zeólitas naturais são direcionadas a aplicações mais relacionadas ao uso de sintéticas e vice-versa. Um exemplo é o caso da indústria petroquímica na Hungria, em que ocorre o uso de modernita e clinoptilolita modificada como catalisadores na isomerização de para-xileno (KALLÓ; PAPP; VALYON, 1982; LUZ, 1995; MUMPTON, 1999).

As zeólitas sintéticas têm grande importância na indústria do petróleo, particularmente no refino. A utilização como catalisadores das zeólitas do tipo X e Y, ambas da família das faujasitas, permitiu um grande ganho em sua seletividade e atividade na unidade de FCC (*Fluid Catalytic Cracking*), além de maior estabilidade térmica e hidrotérmica, obtendo como resultado um maior rendimento em gasolina e menor rendimento em coque e gás para o processo (SILVESTRE; VIEIRA; BARRETO, 2012). Atualmente, são destinados às unidades de FCC mais de 95% do mercado global de zeólitas como catalisadores (YILMAZ; TRUKHAN; MÜLLER, 2012). Outra importante aplicação das zeólitas sintéticas, sobretudo as do tipo A, é para a produção de detergentes, na qual atua como agente de troca iônica para o amolecimento da água, ou seja, remoção dos íons de cálcio e magnésio (XU *et al.*, 2007). Sua utilização na formulação de detergentes veio ao encontro da necessidade da indústria em reduzir o uso de tripolifosfato de sódio para amolecimento da água, cuja presença em corpos d'água leva a problemas de eutrofização (FLANIGEN, 1991; LUZ, 1995).

O uso de zeólitas naturais volta-se mais a aplicações extensivas, nas quais as propriedades de adsorção e troca iônica são requeridas, mas sem grandes requisitos de qualidade (XU *et al.*, 2007). Na área ambiental, destaca-se o emprego de zeólitas para tratamento de águas residuais, particularmente na remoção de metais pesados, no controle da poluição por esgoto e outros contaminantes orgânicos, no controle de drenagem ácida de mina e de rejeitos venenosos, dentre outros (MUMPTON, 1999; RESENDE; MONTE; PAIVA, 2008; WILLIAMS, 2018). Também há casos de aplicações de zeólitas naturais para remediação de áreas afetadas por eventos que levam à poluição local aguda, tais como derramamentos de petróleo e derivados, e até mesmo para controle de poluição nuclear. As zeólitas clinoptilolita e chabazita têm sido amplamente usadas em todo o mundo para remover íons radioativos de céscio e estrôncio

dos licores radioativos de usinas nucleares. Quando essas zeólitas atingem a saturação, elas são substituídas e encapsuladas em depósitos de cimento. As zeólitas também foram usadas com sucesso na limpeza de Three Mile Island, no estado da Pensilvânia nos EUA, onde a água radioativa foi bombeada através de colunas contendo a mistura das zeólitas, removendo efetivamente os íons de césio e estrôncio (FLANIGEN, 1991; LUZ, 1995; MUMPTON, 1999).

Além das aplicações ambientais extensivas, as zeólitas naturais também são empregadas para fins de melhoria do solo e da produtividade da agricultura. Podem atuar como condicionadores de solo, elevando sua capacidade de reter água e de armazenar nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio (NPK), liberando-os lentamente e evitando sua perda por lixiviação. Essa característica também potencializa o efeito da aplicação combinada de zeólitas com fertilizantes (RESENDE; MONTE; PAIVA, 2008; WILLIAMS, 2018). Há também aplicação de zeólitas naturais na pecuária, seja para alimentação animal, onde a aplicação de zeólitas pode proporcionar ganhos nas taxas de crescimento e engorda, seja no controle da liberação de compostos nitrogenados (essencialmente amônia), que causam fortes odores nos ambientes de criação, como no caso de cama de aviário, ou levam à proliferação de algas indesejáveis nos ambientes de aquicultura (RESENDE; MONTE; PAIVA, 2008). No mais, zeólitas naturais também encontram aplicação importante no setor de construção, especificamente na formulação de cimentos e agregados leves (LUZ, 1995; RESENDE; MONTE; PAIVA, 2008).

4.1.1.3 Mercado de zeólitas

A maior parte do valor do mercado global está associada à comercialização de zeólitas sintéticas. As diferenças de qualidade dos produtos levam a um considerável prêmio de preço pago pelas zeólitas sintéticas em relação às naturais, assim como ao acesso a mercados mais nobres. O Serviço Geológico dos EUA (USGS) estima que o mercado global de zeólitas sintéticas em 2018 totalizava dezenas de bilhões de dólares, ao passo que o mercado para as zeólitas naturais provavelmente se restringia a dezenas de milhões de dólares (USGS, 2021). Entretanto, relatórios de empresas de consultoria de mercado apontam valores superiores para o mercado de zeólitas naturais. Por exemplo, a empresa Grand View Research aponta uma participação de 13% de zeólitas

naturais em um mercado global de 12,6 bilhões de dólares, totalizando um mercado para as zeólitas naturais de cerca de 1,6 bilhões de dólares (GRAND VIEW RESEARCH, 2023). Em base física, estima-se que o mercado global de zeólitas movimentou cerca de 6,1 milhões de toneladas do produto em 2021 (GRAND VIEW RESEARCH, 2023), com 63% referentes a zeólitas sintéticas e o restante a zeólitas naturais (S&P GLOBAL, 2022).

Acerca das estimativas de valor para o mercado global, há discrepâncias entre as informações públicas disponibilizadas pelas empresas de consultoria de mercado. Enquanto as empresas Grand View Research (2023) e Markets and Markets (2023) estimam um mercado global de aproximadamente 12 bilhões de dólares em 2021, a empresa Global Information (2021) estimou o mercado global de zeólitas em cerca de 27 bilhões de dólares em 2020. A discrepância também se apresenta em estimativas interanuais fornecidas pelas mesmas empresas, como o caso da estimativa da Grand View Research de um mercado global de zeólitas de aproximadamente 29 bilhões de dólares, conforme reportado por Margeta e Farkaš (2020), frente à estimativa de 12 bilhões de dólares em 2021 (GRAND VIEW RESEARCH, 2023). Como não há informações públicas de uma série histórica de tais estimativas de valores, não é possível inferir se a discrepância resulta de algum choque econômico disruptivo no setor em função, por exemplo, da pandemia de COVID-19 em 2020, ou se decorre das próprias estimativas, seja por mudanças metodológicas ou erros nos cálculos.

Acerca dos usos aos quais as zeólitas se destinam, a Figura 4-2 mostra a divisão dos valores de mercado para os principais tipos de aplicação, com base no relatório da empresa Grand View Research (2023). Nota-se que o mercado de catalisadores representa quase metade do valor gerado para a cadeia produtiva das zeólitas, sendo que mais de 95% desse mercado depende do uso em unidades de FCC no refino de petróleo (YILMAZ; TRUKHAN; MÜLLER, 2012). Assim, pode-se apontar que imposições de redução da produção de combustíveis derivados de petróleo face à descarbonização da economia mundial pode também ter impactos importantes na indústria global de zeólitas conforme sua configuração atual.

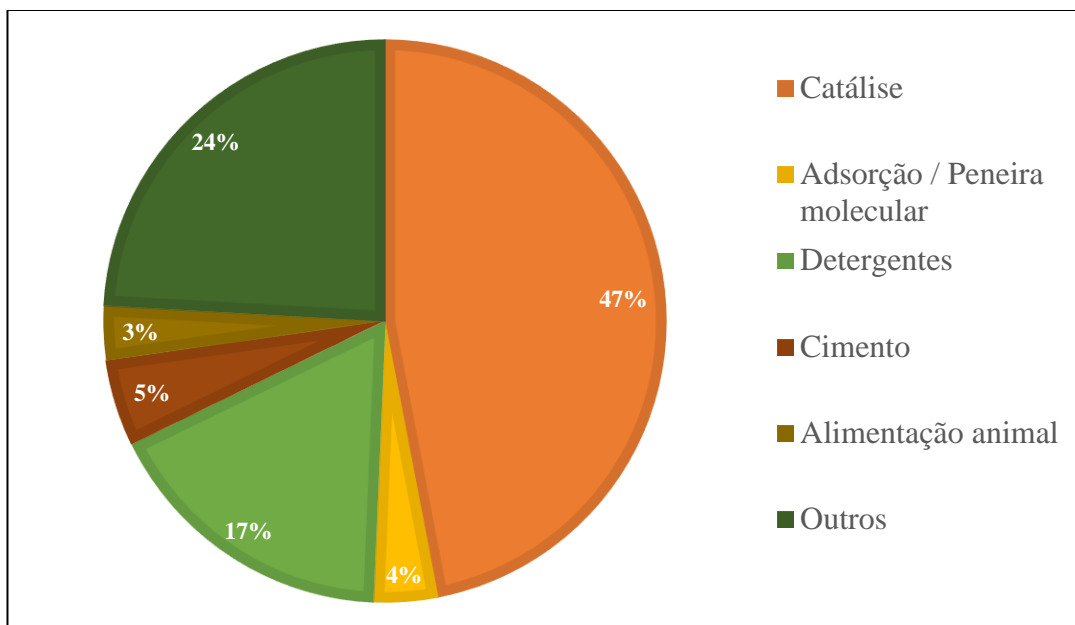


Figura 4-2. Participação de cada tipo de uso final no valor do mercado das zeólitas

Fonte: Adaptado de Grand View Research (2023)

Em base física, no entanto, o principal consumidor de zeólitas é a indústria de detergentes, para o qual foi destinada cerca de 62% da produção global de zeólitas sintéticas em 2021, enquanto que a indústria de catálise consumiu aproximadamente 20% deste montante (S&P GLOBAL, 2022). Esse quadro se coaduna com o informado por Luz *et al.* (1995) na década de 1990, que da produção de zeólitas sintética “dois terços se destinam à manufatura de detergentes, e o terço restante aos processos de catálise”. Contudo, verifica-se atualmente uma tendência de queda relativa no volume de zeólitas utilizado na fabricação de detergentes, em razão de ganhos de eficiência dos componentes zeolíticos, competição com outros tipos de insumos para detergentes sólidos e o avanço no uso de detergentes líquidos que não contém zeólitas (S&P GLOBAL, 2022).

Geograficamente, o consumo de zeólitas concentra-se em países desenvolvidos da América do Norte, Europa Ocidental e na Ásia, particularmente na China e Japão (S&P GLOBAL, 2022; YILMAZ; TRUKHAN; MÜLLER, 2012). O volume de consumo de zeólitas sintéticas é puxado por países da OCDE, como EUA, Alemanha e Japão, que possuem maturidade comercial no uso da substância para a produção de detergentes (S&P GLOBAL, 2022). Em termos de valor, o mercado das zeólitas sintéticas é majoritariamente impulsionado pela aplicação em catálise, sobretudo para

craqueamento de petróleo. O maior mercado de zeólitas para catálise está na América do Norte, em particular nos EUA, seguido pela China (S&P GLOBAL, 2022). Enquanto isso, o mercado de construção civil é o maior impulsionador do consumo global de zeólitas naturais (LUZ, 1995; MARKETS AND MARKETS, 2023).

No Brasil, há algumas empresas que atuam no setor de zeólitas naturais e sintéticas, visando diferentes aplicações comerciais. Na produção de zeólitas naturais, destaca-se a empresa Celta Brasil, com matriz na cidade de Cotia, São Paulo (SP), e sede em Itajaí, Santa Catarina (SC) (CELTA BRASIL, 2023). A empresa produz 27 produtos zeolíticos, com predominância de clinoptiolita (VILLARROEL-ROCHA *et al.*, 2021), voltados a aplicações nas áreas de agricultura, nutrição animal, tratamento de água, indústria, tintas e polímeros (CELTA BRASIL, 2023). Quanto à produção de zeólitas sintéticas, a base de dados Brazilian Chemicals, produzida pela Associação Brasileira da Indústria Química (ABIQUIM), e que lista fabricantes brasileiros de produtos químicos, aponta dois fornecedores: as empresas Diatom e UNA-PROSIL (ABIQUIM, 2017). A Diatom possui sede em Mogi das Cruzes, SP, e produz zeólitas do tipo 4A, visando aplicações para as indústrias de tintas e detergentes (DIATOM, 2023). Já a UNA-PROSIL tem sede em Cajamar, SP, e atua como fornecedora de silicato de sódio para a produção de zeólitas (UNA-PROSIL, 2023). Para o mercado de catálise, a única empresa de zeólitas sintéticas atuante no Brasil é a Fábrica Carioca de Catalisadores (FCCSA), localizada na cidade do Rio de Janeiro, RJ (ABIQUIM, 2017). Fundada em 1985 como uma joint-venture das empresas Petrobras, Akzo Nobel e Oxiten, sendo atualmente controlada pela Petrobras e a Albemarle Catalysts, a FCCSA manufatura diferentes produtos zeolíticos voltados à indústria petroquímica brasileira (FCCSA, 2006, 2023). De acordo com Luz (1995), a empresa possui capacidade de produzir 25 mil toneladas por ano de catalisador zeolítico para craqueamento catalítico de petróleo.

4.1.1.4 A captura de CO₂ com zeólitas

A aplicação de zeólitas para separação de CO₂ de correntes gasosas é uma operação de longa data na indústria. De acordo com Li *et al.* (2013), uma das primeiras patentes a respeito de zeólitas trata de um método para separar CO₂ de correntes gasosas, com a recuperação das zeólitas sendo feita pela passagem de uma gás de regeneração aquecido. Segundo Luz (1995), nos EUA a modernita é aplicada industrialmente na adsorção do CO₂ para purificação de correntes de gás natural desde 1968. Entretanto, para a separação do CO₂ de correntes exaustas de combustão para fins de redução de emissões de GEE, o uso de ciclos de adsorção com adsorventes sólidos ainda se encontra em estágio incipiente de maturidade tecnológica.

O mecanismo de separação do CO₂ de efluentes gasosos utilizando zeólitas baseia-se no processo de adsorção, no qual o gás entra em contato com o interior dos sólidos e o gás carbônico adere seletivamente a sua superfície, por meio de interações físicas fracas do tipo dipolo induzido (OLIVARES-MARÍN; MAROTO-VALER, 2012). Posteriormente, realiza-se o processo de dessorção, onde o CO₂ é separado do interior dos sólidos pela quebra das interações físicas do gás com sua superfície, gerando uma corrente de elevada pureza do gás, enquanto a zeólita pode retornar ao processo de adsorção (LEUNG; CARAMANNA; MAROTO-VALER, 2014). A regeneração das zeólitas pode ser feita por diferentes estratégias: variação da pressão (PSA – *Pressure Swing Adsorption*), variação da temperatura (TSA – *Temperature Swing Adsorption*), aplicação de pressões manométricas negativas (VSA – *Vacuum Swing Adsorption*), passagem de corrente elétrica (ESA – *Electric Swing Adsorption*) e a combinação do uso de pressões manométricas negativas com variação da temperatura (VTSA – *Vacuum and Temperature Swing Adsorption*) (SONGOLZADEH; RAVANCHI; SOLEIMANI, 2012).

O uso de zeólitas como alternativa aos solventes para sequestro de CO₂ com fins específicos de mitigação das emissões GEE em empreendimentos emissores de grandes volumes, como plantas termelétricas ou refinarias de petróleo, começou a ser considerado no início da década de 1990 (CHUE *et al.*, 1995; ISHIBASHI *et al.*, 1996), tendo havido grande progresso desde então, sobretudo para a melhoria da capacidade de captura de CO₂, seletividade e tolerância a impurezas dos adsorventes (BUI *et al.*,

2018). Outrossim, o desenvolvimento de processos de adsorção de CO₂ empregando as zeólitas também teve grande progresso ao longo das últimas três décadas, tendo sido concebidos diversos processos cíclicos que utilizam diversas estratégias de regeneração com diferentes conceitos, como o uso de reatores de leito fluidizado ou móvel (BUI *et al.*, 2018; WEBLEY, 2014).

Como vantagens do uso de adsorventes para captura de CO₂ pós-combustão, pode-se citar que a tecnologia permite adaptação de plantas industriais existentes para adição de um novo módulo de captura por adsorção, que pode ser otimizado de acordo com as restrições de área e de investimento. Ademais, diferentes tipos de adsorventes podem ser aplicados de acordo com a faixa de temperatura de operação desejada (BUI *et al.*, 2018). Comparando-se com a captura por solventes baseados em aminas, há uma clara vantagem do ponto de vista ambiental do uso de adsorventes em geral, visto que as aminas tendem a decompor termicamente e liberar compostos tóxicos e corrosivos (BUI *et al.*, 2018). Ainda sobre a questão ambiental, destaca-se que o uso de resíduos diretamente ou ainda como matéria-prima na formulação de zeólitas pode aumentar substancialmente o desempenho ambiental do processo de captura (BUI *et al.*, 2018; CHAN *et al.*, 2017; MERCEDES MAROTO-VALER *et al.*, 2008; OLIVARES-MARÍN; MAROTO-VALER, 2012).

A indústria brasileira de carvão aposta no desenvolvimento da tecnologia de adsorção para captura de CO₂ em usinas termelétricas que queimam o combustível fóssil no país, na perspectiva de viabilizar a manutenção desse tipo de geração elétrica em um provável futuro no qual a neutralidade climática é buscada no país. Nesse sentido, a Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina (SATC) firmou parcerias com diversas instituições nacionais e internacionais para a construção de uma planta piloto de captura de CO₂ pós combustão, utilizando um processo TSA com leito movente do adsorvente com base na patente de Knaebel (2013). A planta, com capacidade consistente com uma termelétrica a carvão de 50 kW já se encontra operante, havendo rodado alguns testes com adsorventes comerciais (SATC, 2019). A perspectiva da instituição é desenvolver o processo em escala de demonstração industrial em um passo seguinte, com a meta de atingir grau de maturidade para a escala comercial até 2030 (SATC, 2020).

4.1.1.5 Produção de zeólitas a partir de cinzas de carvão mineral

Diversos trabalhos vêm surgindo na literatura científica sobre a formulação de adsorventes a partir de rejeitos de processos. Particularmente, a produção de zeólitas a partir de cinzas volantes de carvão tem sido objeto de bastante estudo. De acordo com Olivares-Marín e Maroto-Valer (2012), que realizaram uma revisão da literatura sobre o desenvolvimento de adsorventes para captura de CO₂ a partir de materiais residuais, as cinzas volantes têm sido empregadas de maneira eficaz para a produção de adsorventes de CO₂ baseados em zeólitas, para processos de captura em baixas, médias e altas temperaturas. Majchrzak-Kucęba e Nowak (2005) produziram zeólitas a partir de cinzas volantes por dois métodos, a conversão alcalina e a fusão com hidróxido de sódio seguido de reação hidrotérmica, e, posteriormente, promoveram a adsorção do CO₂ em um fluxo isotérmico de uma mistura de gases (10% de O₂, 10% de CO₂ e 80% de N₂), obtendo como resultado parâmetros de adsorção para as zeólitas sintetizadas semelhantes aos observados em zeólitas comerciais. Liu *et al.* (2011) sintetizaram zeólitas A e misturas de zeólitas A e X de cinzas volantes utilizando o método da fusão com hidróxido de sódio e reação hidrotérmica, analisando posteriormente sua performance como adsorvente com um processo VSA. Obtiveram como resultado um desempenho para as zeólitas sintetizadas superior ao verificado para zeólitas X comerciais a uma temperatura de 90°C.

Cientistas no Brasil também vêm pesquisando a possibilidade de produzir zeólitas a partir de cinzas de carvão mineral. Aquino *et al.* (2016) analisaram a etapa de fusão de cinzas volantes de carvão brasileiro prévia à síntese hidrotérmica, obtendo como resultado que a uma razão NaOH/cinzas entre 1,2 e 1,5 há uma decomposição dos minerais mullita e quartzo presentes originalmente nas cinzas, o que é positivo para a síntese posterior das zeólitas. Costa *et al.* (2016) estudaram o pré-tratamento das cinzas de carvão brasileiras na síntese hidrotérmica de zeólitas, para redução do seu teor de carbono incombusto e óxidos de ferro, tendo encontrado uma influência positiva dessas etapas na qualidade do produto zeolítico. Aquino *et al.* (2017) sintetizaram zeólitas tipo X de cinzas volantes e de fundo, logrando boa qualidade para as produzidas por ambas as matérias-primas.

No que concerne o uso das zeólitas sintetizadas a partir de cinzas volantes de carvão, houve importantes publicações com o envolvimento de cientistas brasileiros voltadas a duas grandes aplicações: uso com fertilizantes e separação de gases, sobretudo CO₂. No âmbito dos fertilizantes, Bonetti *et al.* (2021) testaram o uso de três tipos de zeólitas sintetizadas de cinzas para a adsorção de nutrientes em soluções-simulacros de efluentes industriais para posterior uso do produto enriquecido como fertilizante de liberação lenta, encontrando bons resultados de desempenho das zeólitas para essa aplicação, sobretudo da do tipo X modificada com cloreto de cálcio. Estevam *et al.* (2022) avaliaram zeólitas do tipo Merlinoita sintetizadas a partir de cinzas como material de suporte para fertilizantes de potássio. Os resultados obtidos indicaram bons resultados em termos de liberação lenta do nutriente. Bonetti *et al.* (2022) avaliaram a resposta da produtividade à aplicação de zeólitas X sintetizadas de cinzas e previamente carregadas com fósforo e potássio no cultivo de *Tagetes patula*, verificando um desempenho igual ou superior do desenvolvimento das plantas em relação às amostras cultivadas com fertilizantes comerciais.

No âmbito da separação de gases, Aquino *et al.* (2020) mediram a capacidade de adsorção de zeólitas tipo X e A, sintetizadas a partir de cinzas, para avaliar seu desempenho em processo TSA para captura de CO₂. Verificaram que mesmo após 5 ciclos de adsorção com CO₂, as zeólitas mantiveram sua capacidade de adsorção, indicando sua boa aplicabilidade para esse fim. Moreles-Ospino *et al.* (2020) avaliaram a capacidade e seletividade de zeólitas X e A para a captura de CO₂ em misturas com nitrogênio nas proporções típicas de gases exaustos (15/85 %v/v), obtendo resultados ligeiramente inferiores de capacidade das zeólitas sintetizadas de cinzas em relação a zeólitas comerciais.

Quanto ao desenvolvimento da tecnologia, a SATC também desenvolveu parcerias para a construção de uma planta piloto para síntese de zeólitas a partir de cinzas de carvão mineral. A planta possui uma capacidade de produção de 200 kg de zeólitas por batelada. A proposta é que as zeólitas produzidas sejam testadas para diferentes aplicações, incluindo a captura de CO₂, por meio da planta piloto de leito móvel comissionada na instituição (SATC, 2020).

4.1.2 Proposta de sistema

A síntese de zeólitas a partir de cinzas de carvão mineral com a finalidade de uso para captura de CO₂ na própria usina termelétrica que queima o carvão e gera as cinzas é um exemplo de sistema circular, no qual o resíduo gerado retroalimenta o processo de forma a melhorar seu desempenho ambiental. Tal desenho de sistema já foi proposto em diferentes estudos apresentados na literatura (BOYCHEVA; MARINOV; ZGUREVA-FILIPOVA, 2021; LIU, L. *et al.*, 2011; MERCEDES MAROTO-VALER *et al.*, 2008; ZHANG, Z. *et al.*, 2017).

Contudo, apesar de o caráter circular de tais sistemas ser qualitativamente acertado, há um desequilíbrio fundamental de ordem quantitativa. As cinzas de carvão mineral são geradas em volumes muito superiores ao necessário para produzir a quantidade de zeólitas demandada pela captura de CO₂. Outrossim, a geração de cinzas dá-se de forma contínua, enquanto as zeólitas são utilizadas para capturar CO₂ em ciclos, havendo apenas uma pequena parcela de reposição contínua de zeólitas frescas no processo (*make-up*) para compensar as perdas físicas e manter o desempenho do leito. Para fins de comparação, estima-se que uma usina termelétrica de 330 MW a carvão mineral brasileiro, com aproximadamente 40% de cinzas, gere cerca de 400 mil toneladas de cinzas em um ano, ao passo que a estimativa do consumo anual de zeólitas para a operação de captura de CO₂ seja próximo a 8 mil toneladas (ver estimativas detalhadas na seção 5.2.1). Assumindo que cerca de 0,85 toneladas de cinzas geram uma tonelada de zeólitas, há um claro excedente de produção de cinzas para além do autoconsumo de zeólitas necessário para a operação de captura de CO₂ em uma usina termelétrica a carvão mineral.

Assim sendo, este trabalho propõe uma avaliação do potencial de uso integral das cinzas produzidas para a fabricação de zeólitas, direcionando parte da produção para a captura de CO₂ por adsorção na usina termelétrica em que as cinzas são geradas e o excedente de produção para capturar CO₂ em termelétricas a biomassa. A Figura 4-3 ilustra de maneira esquemática o sistema proposto.

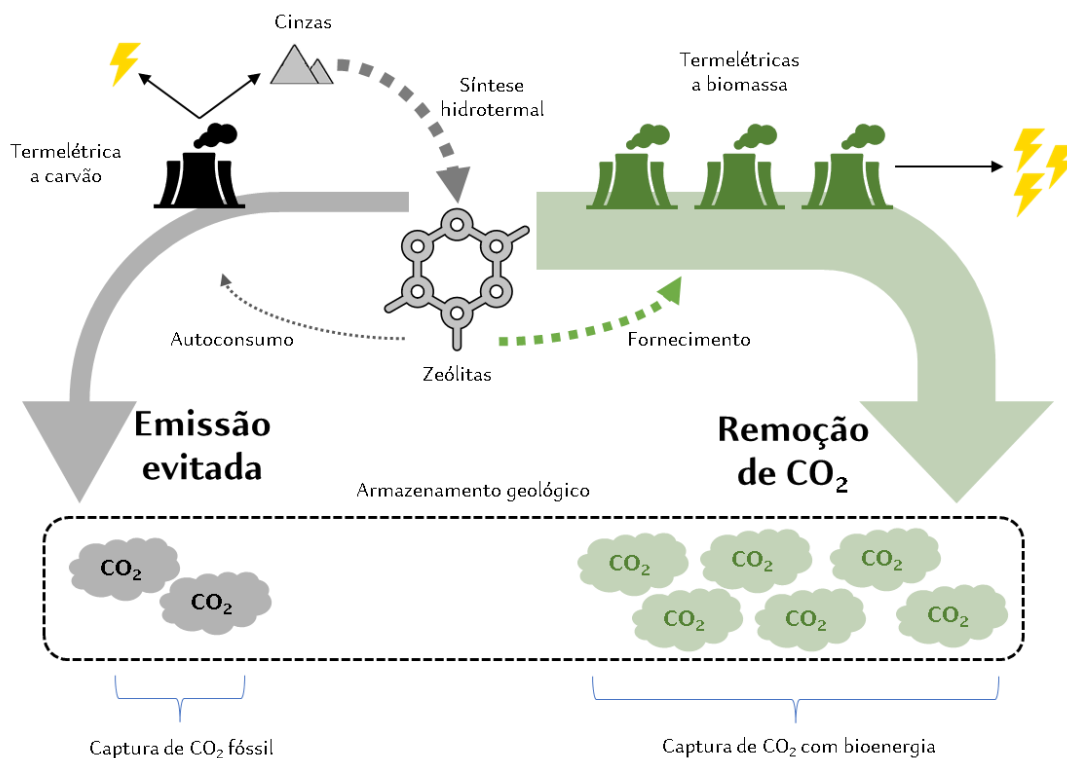


Figura 4-3. Proposta de sistema para remoção de CO₂ da atmosfera a partir de zeólitas produzidas de cinzas de carvão mineral

Fonte: Elaboração própria

A partir do sistema proposto, é possível obter emissões negativas com o uso de um resíduo da queima de carvão mineral, ao mesmo tempo em que grande parte das emissões fósseis da combustão do carvão também são reduzidas. Além disso, o sistema demanda a manutenção parcial das atividades associadas à cadeia produtiva do carvão mineral, com um impacto climático consideravelmente reduzido, para que se viabilize uma remoção quantitativamente muito superior de dióxido de carbono da atmosfera.

O Brasil apresenta duas vantagens críticas para a aplicação de um sistema dessa natureza. Uma delas é que o país é dotado de reservas carboníferas com baixo grade, ou seja, elevados teores de cinzas (CGEE, 2012; EPE, 2016). Não obstante essa característica ser destacada como uma grande desvantagem para o uso industrial e energético desses recursos, o alto teor de cinzas do carvão mineral eleva a quantidade produzida do principal insumo para as zeólitas por unidade de energia fóssil gerada, proporcionando maior rendimento em remoção de CO₂ para o sistema como um todo. A outra vantagem é o amplo uso de bioenergia no Brasil, particularmente na geração

termelétrica, para qual a capacidade instalada atual é de aproximadamente 17 GW, ou 8,8% da capacidade total de geração elétrica do país (ANEEL, 2023).

4.2 Outros sistemas propostos

4.2.1 Uso do espaço e da infraestrutura de minas de carvão deplecionadas para estocagem permanente de carbono na forma de biochar

Conforme apresentado na seção 2.4.1.1.4, o biochar é, de forma simplificada, o carvão vegetal empregado em aplicações não energéticas. Assim como o carvão mineral, o biochar apresenta alto teor de carbono fixo, além de outros compostos voláteis. Quando adicionado ao solo, uma parte do carbono de sua estrutura se decompõe, denominada “carbono lábil”, enquanto o chamado “carbono recalcitrante” mantêm-se fixado no solo por longos períodos de tempo, que podem chegar a séculos ou milênios (LEHMANN; JOSEPH, 2009; NOVOTNY *et al.*, 2015; WOOLF *et al.*, 2010).

Em geral, a forma com a qual os estudos científicos avaliam o potencial do biochar como uma NET se dá pela sua aplicação em solos de uso agropecuário, dado os potenciais benefícios que o biochar os proporciona (LATAWIEC *et al.*, 2019; MINX *et al.*, 2018; SMITH *et al.*, 2016; WOOLF *et al.*, 2010). Há também estudos que avaliam o biochar para recuperação ambiental de áreas degradadas ou contaminadas. Estes, porém, geralmente apresentam o potencial de sequestro de carbono qualitativamente, como um cobenefício do processo de regeneração do ambiente físico (ANAWAR *et al.*, 2015; FESTIN *et al.*, 2018; PAGE-DUMROESE *et al.*, 2018; PELTZ; HARLEY, 2016).

Ambas as aplicações, apesar de relevantes, são limitadas no que concerne seu potencial de RCA, em função de seu caráter extensivo de uso da terra. Nesses sistemas extensivos, a quantidade de carbono sequestrado é dada principalmente em função da taxa de incorporação do carbono do biochar no solo superficial, que apresenta limites físicos estimados em até 50 toneladas de carbono por hectare (WOOLF *et al.*, 2010). Isso faz com que processos de RCA em larga escala utilizando biochar requeiram o uso de grandes porções de terra. Por um lado, geram-se altos custos associados à logística para espalhamento do biochar sobre áreas muito extensas, além de um possível efeito negativo de feedback no ciclo de vida do sistema, em função de um provável consumo elevado de combustíveis para movimentar as máquinas pesadas condutoras da operação. Por outro lado, a

incerteza sobre a permanência do carbono do biochar no solo das terras agrícolas por longos períodos configura um possível problema de governança, requerendo o desenvolvimento e aplicação de sistemas confiáveis de monitoramento, reporte e verificação para garantir a estabilidade desse carbono fora da atmosfera.

Isso traz à tona possíveis vantagens de aplicações de biochar como NET que possam ser intensivas no uso da terra. Nesse sentido, é proposto neste trabalho um arranjo produtivo para a cadeia de biochar que destine o produto a minas de carvão deplecionadas, ao invés de terras agrícolas. Dessa forma, ao invés do solo, é utilizado um reservatório geológico como estoque final de carbono, o que aumenta consideravelmente a capacidade de armazenamento por unidade de uso da terra.

Um esquema do arranjo produtivo proposto é apresentado na Figura 4-4. Em essência, a proposta consiste em um sistema possível de ser classificado como uma “mineração reversa de carbono”. Nele, a biomassa localmente disponível é convertida a biochar por meio de fornos de pirólise instalados em locais próximos à mina de carvão deplecionadas. A biomassa convertida pode ser de qualquer natureza, tanto cultivada de forma dedicada para esse fim ou quanto de caráter residual (resíduos agrícolas, florestais ou urbanos), desde que esteja disponível próxima ao sítio de mineração. Na sequência, o biochar é injetado nas minas e fixado, de forma que permaneça permanentemente estocado na formação geológica. As operações de injeção nas minas deplecionadas poderiam se beneficiar dos fatores de produção (capital e trabalho) já mobilizados para a extrair o minério ROM, utilizando-os em sentido reverso. As experiências de práticas de recuperação ambiental de minas de carvão podem ser empregadas para embasar os processos de injeção de biochar nas minas. Assim, minas subterrâneas podem fazê-lo a partir de esquemas de *backfilling*, particularmente do tipo *rockfill* (FARIAS, 2019; HEEMANN; COSTA, 2008). Já minas a céu aberto podem empregar o uso de biochar no processo de recuperação das áreas impactadas no período posterior ao ciclo produtivo das minas (POLZ, 2008), contabilizando o carbono fixado de acordo com a quantidade de biochar utilizada.

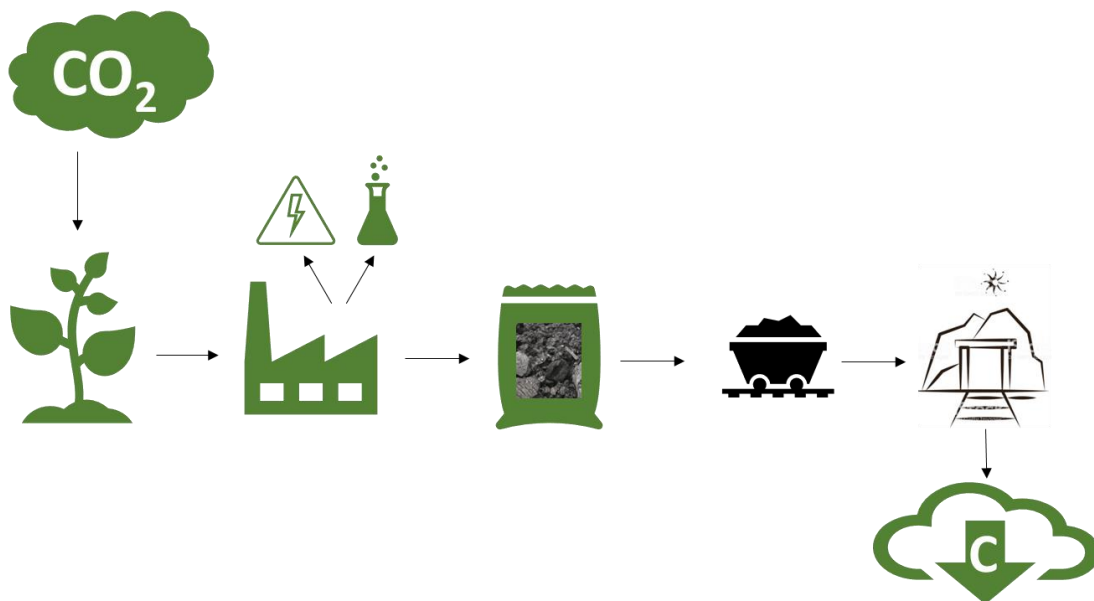


Figura 4-4. Esquematização do sistema proposto de mineração reversa de carbono

Fonte: Elaboração própria

O grande benefício do sistema proposto no âmbito da transição justa está na possibilidade de manter empregos no setor de mineração, que é o segmento socialmente mais vulnerável aos impactos da descarbonização, em virtude da característica inflexibilidade da mão-de-obra associada (ver seções 2.4.2 e 3.3). Outros possíveis benefícios ambientais também seriam possivelmente percebidos pela implementação do sistema proposto. Dado seu típico poder adsorvente (FESTIN *et al.*, 2018; KIM *et al.*, 2014), o biochar pode auxiliar na estabilização da liberação de contaminantes dos solos se incorporado ao rejeito da mineração no processo de recuperação ambiental. Particularmente para a minas subterrâneas, a implementação do *backfilling* com biochar também pode ser útil para fins de estruturação do subsolo, minimizando problemas de subsidência dos terrenos na superfície.

O provável gargalo para o ritmo de provisão do serviço de RCA desse sistema é a oferta de biomassa, visto que a logística é um grande problema para a cadeia de aproveitamento da biomassa em larga escala. Assim, a princípio, deve-se considerar apenas o potencial de biomassa disponível em um raio próximo, por exemplo, de até 50 ou 100 km do local de mineração (CARVALHO *et al.*, 2019; DA SILVA, F. T.

F., 2017; HOFFMANN; SZKLO; SCHAEFFER, 2012; PORTUGAL-PEREIRA *et al.*, 2015).

Contudo, é importante ressaltar que a pirólise tende a facilitar a logística da biomassa, sobretudo se seguida de um processo de densificação, como a briquetização (DA SILVA, F. T. F., 2017; OLIVEIRA, L. G. S. DE, 2011). Portanto, uma possível formação de mercado de fornecimento de biochar para o sistema poderia facilitar o transporte da biomassa desde localidades mais distantes, permitindo ganhos de escala à mineração reversa. A formação desse mercado também poderia ser muito importante no longo prazo: em um cenário no qual a capacidade de estocagem de biochar chegasse a seu limite, os fornecedores poderiam passar a direcionar sua produção de biochar em escala para a geração de bioenergia, aproveitando da estrutura, do *know-how* e dos modelos de negócios criados para atender às necessidades do sistema de mineração reversa. Além disso, o processo de pirólise coproduz substâncias líquidas e gasosas, que podem ser queimadas para a geração de eletricidade e exportação dos excedentes ou mesmo para a recuperação de produtos químicos de alto valor agregado (BALAT *et al.*, 2009; FUSS *et al.*, 2018; KOPPEJAN *et al.*, 2012; NAIK *et al.*, 2010). Com isso, o domínio tecnológico do processo de pirólise em larga escala visando inicialmente a provisão de biochar para sequestro de carbono em minas deplecionadas também pode abrir novas oportunidades de negócios no longo prazo.

O sistema proposto de uso do espaço e da infraestrutura de minas de carvão deplecionadas para estocagem permanente de carbono na forma de biochar, ou simplesmente mineração reversa de carbono, configura uma proposta inovadora para repropósito da cadeia de mineração em prol da oferta do serviço de RCA. Assim, a proposta alinha a prestação de um serviço essencial para as ambições climáticas em curso no âmbito do Acordo de Paris com a possibilidade de manutenção da atividade produtiva em um setor socialmente vulnerável à descarbonização.

4.2.2 Captura de CO₂ associada ao coaproveitamento de biomassa e carvão para descarbonização do cimento

Conceitualmente, a captura e armazenamento de CO₂ tem como resultado um balanço de emissões de GEE diferente, de acordo com a origem do carbono. Para o carbono de origem fóssil, a captura de CO₂ evita emissões, já para o carbono biogênico, a captura de CO₂ produz um balanço negativo de emissões (ver seção 2.4.1.1.2).

Para ilustrar, tome-se um caso hipotético em que uma usina a carvão mineral, equipada com uma unidade de captura com eficiência de 90%, emite 100 unidades de CO₂. Capturando 90% do CO₂, que será encaminhado para o armazenamento, o balanço líquido de emissões para a atmosfera serão as 10 unidades de CO₂ não capturadas. Tomando agora um caso similar, porém com o carbono proveniente de biomassa, o balanço representa um saldo negativo, ou seja, de 90 unidades removidas da atmosfera. Assumindo-se um terceiro caso combinando os dois anteriores, ou seja, de uma queima de carvão junto com biomassa, a captura de CO₂ representaria a emissão positiva de 10 unidades de CO₂ junto com a emissão negativa de 90 unidades de CO₂, o que implica um saldo líquido de 80 unidades de CO₂ removidas da atmosfera. Assim sendo, um caso geral para o saldo de emissões no coaproveitamento pode ser obtido pela Equação 4-1.

$$S_{FB} = m_{CO_2} * [(1 - \eta) * W_{CO_2,F} - \eta * W_{CO_2,B}] \quad \text{Equação 4-1}$$

Em que S_{FB} é o saldo de emissões do coaproveitamento (tCO₂/h), m_{CO_2} é o fluxo mássico total de CO₂ do processo (tCO₂/h), η é a eficiência de captura do CO₂, $W_{CO_2,F}$ é a fração mássica de carbono fóssil da mistura de combustíveis e $W_{CO_2,B}$ é a fração mássica biogênica de carbono.

A fração mássica fóssil e biogênica do carbono da mistura de combustíveis depende essencialmente do teor de carbono fóssil e renovável que há na mistura considerada. Isso será função da participação de cada combustível no *blend* e do teor de carbono que cada um dos componentes possui. Portanto, o cálculo das frações mássicas fóssil e biogênica de carbono podem ser feitos pela Equação 4-2e pela Equação 4-3 , respectivamente.

$$W_{CO_2,F} = \frac{(1 - X_B) * \%C_F}{(1 - X_B) * \%C_F + X_B * \%C_B} \quad \text{Equação 4-2}$$

$$W_{CO_2,F} = \frac{X_B * \%C_B}{(1 - X_B) * \%C_F + X_B * \%C_B} \quad \text{Equação 4-3}$$

Em que X_B é a proporção mássica de biomassa na mistura dos combustíveis, $\%C_F$ é o teor de carbono do combustível fóssil e $\%C_B$ é o teor de carbono da biomassa.

A análise de sistemas de coaproveitamento de carvão e biomassa com captura de CO_2 , doravante denominado coaproveitamento abatido, para lograr emissões negativas não é nova. Tais sistemas já foram objeto de análise em estudos pretéritos, tais como Jiang *et al.* (2020), que faz uma análise técnico-econômica de uma planta termelétrica de co-queima de carvão e biomassa equipada com sistema de captura de CO_2 pós-combustão com aminas e Hoffmann *et al.* (2014) e Hoffmann (2013) que avaliaram o potencial da coqueima de biomassa com carvão mineral diante de restrições hídricas no estado do Rio Grande do Sul, Brasil.

O arranjo inovador ora proposto aproveita-se da relação de ecologia industrial existente das termelétricas a carvão mineral com a indústria do cimento, dada pelo aproveitamento das cinzas geradas¹⁵. A ideia é que a alocação parcial ou total às cinzas do saldo de emissões negativas obtidos do sistema de coaproveitamento abatido pode proporcionar a elas uma pegada de carbono negativa, a depender dos parâmetros da mistura e da captura de CO_2 do processo que lhes deu origem. Com isso, a incorporação de cinzas com pegada de carbono negativa à mistura do cimento tem o potencial de não apenas reduzir a pegada de carbono do aglomerante, em função do uso reduzido de clínquer, mas de neutralizar suas emissões ou mesmo fazê-las negativas, a depender das composições específicas utilizadas.

A indústria do cimento é responsável por 4% das emissões globais de CO_2 , sendo considerado um dos setores de difícil abatimento (IPCC, 2022a). As emissões de processo, geradas pela produção do clínquer, são responsáveis pela maior parte de sua pegada de carbono. Isso limita as opções para redução da pegada de carbono

do setor, sendo as medidas que permitem a redução de clínquer na composição do cimento as mais eficazes para esse fim.

O cimento é um material compósito, ou seja, formado pela mistura de diferentes materiais, que possui características aglomerantes. Sua principal aplicação é para a fabricação de concreto, para a qual o cimento é misturado com água e agregados inertes (por exemplo, areia) (SNIC, 2019). Produzido pela calcinação do calcário, o clínquer é o principal componente do cimento que lhe confere o caráter aglomerante. Portanto, a redução do teor de clínquer é alcançada pelo emprego de outros materiais na formulação do cimento, que sejam capazes de manter ou melhorar o seu desempenho enquanto aglomerante. As principais variantes desses materiais, denominados adições ou materiais cimentícios suplementares, são a escória granulada de alto forno, as cinzas volantes de termelétricas a carvão, argilas calcinadas e materiais inertes, como o filler calcário (CHEN *et al.*, 2010; JOHN *et al.*, 2018; SNIC, 2019).

Portanto, ao reduzir o teor de clínquer do cimento, as adições evitam uma parte das emissões associadas à sua produção, diminuindo a pegada de carbono do cimento, ou seja, as emissões geradas pela sua cadeia de produção para cada unidade de massa produzida. Contudo, não se tem notícia do uso de adições com potencial de emissões negativas, tais como as cinzas oriundas do coaproveitamento com captura de CO₂.

Ao trabalhar com uma mistura de clínquer, cinzas de carvão e cinzas de biomassa, a pegada de carbono do produto é função da proporção empregada de cada componente. Considerando cada componente, é possível propor a seguinte classificação: o clínquer possui alta emissão positiva de CO₂; as cinzas de carvão mineral do coaproveitamento abatido têm baixa emissão positiva de CO₂; e as cinzas da biomassa do coaproveitamento abatido têm alta emissão negativa de CO₂. Assim, pode-se estabelecer um diagrama ternário para determinação da pegada de carbono da composição final, com o formato esquematizado de forma qualitativa na Figura 4-5.

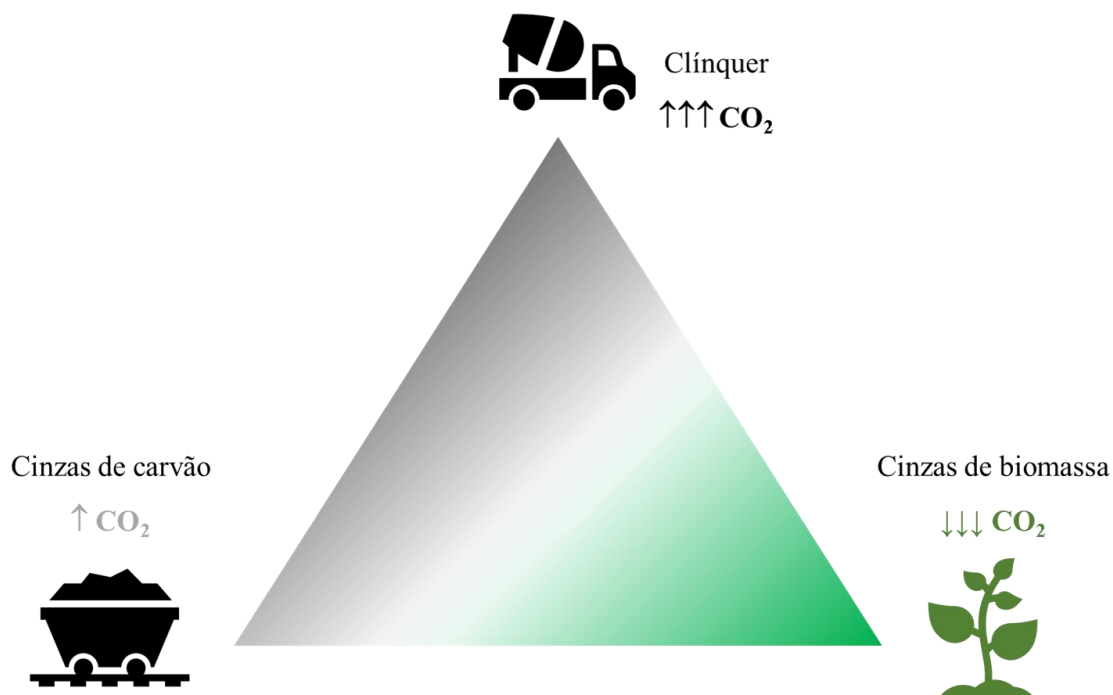


Figura 4-5. Esquemática qualitativa da pegada de carbono em função da composição da mistura cimentícia na forma de um diagrama ternário

Fonte: Elaboração própria

O diagrama apresenta um código de cores em gradiente, em que tons de cinza representam uma pegada de carbono positiva, enquanto tons de verde indicam uma pegada de carbono negativa. A intensidade da pegada de carbono é sinalizada por meio de variações nas tonalidades mais escuras dessas cores. Dessa forma, as regiões de tonalidade branca do diagrama indicam as zonas em que a mistura apresenta pegadas de carbono próximas à neutralidade. Dessa forma, o ponto máximo da pegada de carbono está no vértice superior do diagrama, representado pela composição de clínquer puro na mistura final. À medida em que são acrescentadas cinzas, a pegada de carbono da mistura se reduz gradualmente. Contudo, a redução da pegada de carbono depende da natureza das cinzas obtidas do coaproveitamento abatido. Nesse caso, quanto maior for a participação de biomassa nesse processo, maior o potencial de neutralização da pegada de carbono do material cimentício.

O diagrama apresentado na Figura 4-5 também denota uma possível relação de nexos entre as três indústrias em um novo ecossistema industrial, com potenciais interações benéficas entre os diferentes atores da cadeia do sistema proposto. Para a

indústria do cimento, o sistema ora proposto enriquece o portfólio das escassas possibilidades de descarbonização para a indústria do cimento. A relação com a indústria da biomassa é o que viabiliza a neutralização das emissões, enquanto a relação com a indústria do carvão proporciona mais escala à produção dessas cinzas, viabilizando graus mais elevados de substituição do clínquer e diluindo o custo do serviço de remoção de carbono por unidade de cinzas introduzida.

Pelo lado da biomassa, a relação com a indústria do cimento é fundamental, visto que esta representa a demandante do serviço de RCA no sistema proposto. Já a integração do seu aproveitamento energético com o carvão é importante por algumas razões elementares. Uma delas é para ganho de escala, já que o uso em conjunto com o carvão mineral permite que a biomassa seja processada em plantas de maior porte, resultando em menores custos. Outra vantagem é a possibilidade de o carvão compensar descontinuidades na oferta de biomassa, seja por questões de sazonalidade dos cultivos ou por questões ambientais que porventura possam afetar a safra. A existência do recurso carbonífero pode assegurar o cumprimento de obrigações acordadas, como contratos de fornecimento de cinzas.

Pelo lado do carvão, o principal benefício que o sistema proposto traz é um caminho possível da transição justa, em que a indústria carbonífera passa a contribuir ativamente para a descarbonização de um setor de difícil abatimento. Isso pode ser particularmente relevante para países com carvões gonduânicos de alto teor de cinzas, que estão localizados no Sul Global (CHAVES, 2008). Também são países que concentram mais disponibilidade de terras para o cultivo de biomassa, sobretudo com a recuperação de áreas degradadas (FAO, 2022). Isso representa uma vantagem comparativa potencial para esses países na implementação desses sistemas. Isso pode ser particularmente relevante, no sentido em que a carência de infraestrutura desses países em relação aos Norte Global indica possivelmente que o foco da demanda por cimento estará em países em desenvolvimento. Portanto, a oferta de cimentos com baixa pegada de carbono pode reduzir o impacto do desenvolvimento dos países sobre o clima (JOHN *et al.*, 2018; SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018).

5 Estudo de caso: Análise técnico-econômica da produção de zeólitas de cinzas de carvão mineral para captura de CO₂ com emissões negativas em termelétricas a biomassa no estado de Santa Catarina

5.1 Metodologia

A metodologia adotada para análise do potencial técnico-econômico do sistema proposto para a obtenção de emissões negativas de GEE pode ser descrita em quatro etapas de análise, encadeadas em uma lógica sequencial, conforme ilustra o fluxograma apresentado na Figura 5-1.



Figura 5-1. Fluxograma metodológico da modelagem e análise do sistema proposto de emissões negativas a partir de zeólitas de cinzas de carvão mineral

Fonte: Elaboração própria

Primeiramente, o processo originário das cinzas de carvão mineral, ou seja, a geração termelétrica a partir do combustível fóssil, é caracterizado por meio de uma simulação em *software* próprio para tal, o IECM 11.5 (ver detalhamento das simulações na seção 5.1.1). Para minimizar a pegada de carbono nesta etapa, considera-se também a inclusão de uma unidade de captura de CO₂ para a queima do carvão mineral na usina termelétrica. Após, é realizada no mesmo *software* uma nova simulação do processo de geração termelétrica, considerando diferentes tipos de biomassa como combustível. A proposta é simular arquétipos de usinas termelétricas a biomassa, com foco na captura de CO₂ por adsorção com zeólitas, para caracterização dos potenciais e demandas do sistema proposto.

Na sequência, é feita uma caracterização do processo de produção de zeólitas a partir das cinzas do carvão mineral, com base em estimativas reais com dados cedidos pela SATC na implementação de sua planta piloto. Daí são obtidos os rendimentos em zeólitas, assim como o potencial global de manufatura com base na quantidade de cinzas obtidas da usina termelétrica fóssil.

Após, realiza-se uma etapa de análise técnico-econômica, consolidando os resultados dos processos que compõem o sistema proposto, caracterizados anteriormente. Nesse sentido, são estimados custos relevantes para a avaliação do sistema, particularmente o custo da produção de zeólitas a partir das cinzas do carvão mineral e os custos de captura do CO₂ para as plantas termelétricas a carvão e a biomassa. No caso do custo das zeólitas, foi efetuado um ajuste dos valores considerando ganhos de escala, referentes à passagem do nível de produção da escala base da planta piloto para uma escala compatível com o nível de produção de cinzas da termelétrica a carvão.

Por fim, é realizada uma análise de barreiras e cobenefícios da implementação do sistema proposto. Essa etapa tem a finalidade de levantar elementos de interesse para subsidiar a formulação de políticas públicas voltadas à implementação do sistema proposto, com foco em uma transição justa para a indústria carbonífera do Brasil, em particular.

As seções subsequentes detalham cada uma das etapas metodológicas, contemplando as premissas e parâmetros empregados.

5.1.1 Simulação de UTE a carvão mineral e a biomassa

Para fins de uma análise quantitativa, realiza-se a aplicação do sistema idealizado para um estudo de caso considerando valores referentes a condições para o Brasil. Para a geração termelétrica a carvão mineral, em particular, assume-se o panorama do estado de Santa Catarina, onde a tecnologia de produção de zeólitas de cinzas e de captura de CO₂ por adsorção com zeólitas é atualmente estudada com aplicações em maior escala no país. Assim, utiliza-se como base de parametrização um simulacro de uma planta *greenfield* operando nas condições do Complexo Jorge Lacerda de geração termelétrica

a carvão mineral para a caracterização tanto do combustível, quanto da unidade de geração termelétrica. A unidade de referência considerada é a UTLC, a mais moderna dentre as usinas do complexo, doravante denominada UTEJLC.

As rodadas de simulação para a usina termelétrica a carvão mineral foram conduzidas no software Integrated Environmental Control Model (IECM) versão 11.5 (IECM, 2021). O IECM é um modelo computacional desenvolvido pela Carnegie Mellon University em parceria com o NETL e com a University of Wyoming. Destina-se à análise de custo e desempenho de usinas de energia que utilizam combustíveis fósseis, podendo ser adaptado para o uso de biomassa. Ele é indicado a engenheiros, pesquisadores, desenvolvedores de tecnologia e analistas de políticas para projetar facilmente a usina a ser modelada e obter resultados rapidamente para várias opções tecnológicas (IECM, 2021).

Primeiramente, define-se no IECM o tipo de planta energético com o qual se pretende trabalhar, que para o objeto do presente estudo é uma usina do tipo carvão pulverizado. Na sequência, é estabelecida a configuração de planta desejada, com os devidos controles ambientais pretendidos. O *software* permite a inclusão de diversos tipos de equipamentos para controle de emissões de poluentes pós-combustão, a citar o controle de NO_x, mercúrio, material particulado, SO₂ e CO₂. Além disso, o *software* também permite que se determinem formas de gerenciamento de água e sólidos na planta, com uma sequência de opções para o sistema de arrefecimento, a gestão de águas residuais e a disposição das cinzas volantes.

No caso da presente análise, o controle ambiental de interesse está na captura de CO₂ com adsorventes sólidos em um ciclo TSA. Contudo, para que se permita a introdução dessa tecnologia na planta termelétrica, o IECM exige a inclusão prévia de todos os demais sistemas de controle pós-combustão, à exceção do controle de mercúrio. A Tabela 5.1 apresenta a definição dos tipos de controle ambiental assumidos para a planta e a Figura 5-2 apresenta um diagrama esquemático dos processos considerados na usina.

Tabela 5.1. Configuração da planta termelétrica a carvão mineral considerada para o sistema proposto

Operação na planta	Tipo de equipamento para controle
Controle de NO _x	Redução catalítica seletiva (SCR)
Controle de Hg	Nenhum ¹
Controle de material particulado	Precipitador eletrostático (ESP)
Controle de SO ₂	Dessulfuração úmida dos gases de combustão (FGD)
Captura de CO ₂	Adsorção com sólidos com ciclo de variação de temperatura (TSA)
Sistema de arrefecimento	Torre úmida de arrefecimento
Gestão de água residual	Tratamento químico
Disposição final de cinzas volantes	Sem mistura com outros sólidos

Notas:

1 – Optou-se por desconsiderar o controle de mercúrio da análise do sistema, pois único método disponível na versão 11.5 do IECM é a injeção de carvão ativado. Como essa operação prevê a coleta dos sólidos na saída do ESP junto com as cinzas volantes, sua inclusão pode inviabilizar o uso das cinzas com insumo para fabricar zeólitas.

Fonte: Elaboração própria

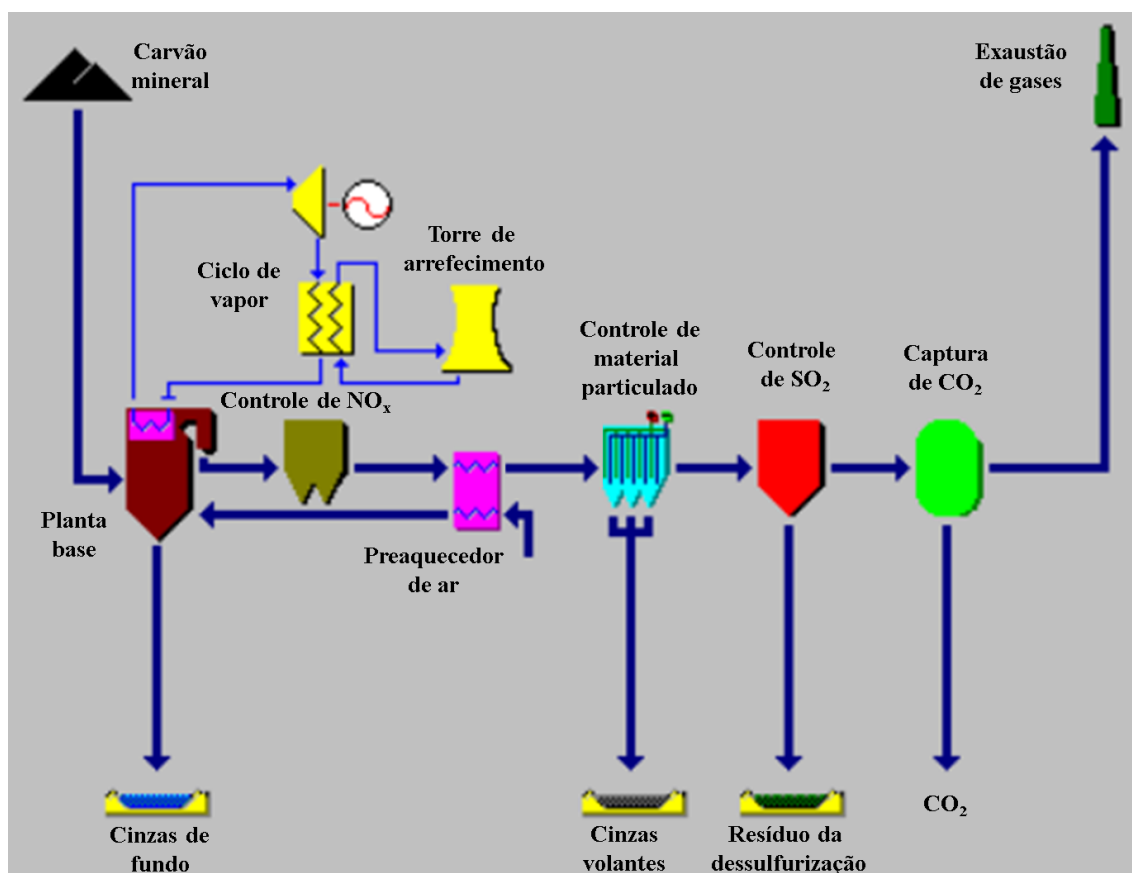


Figura 5-2. Diagrama do processo de geração termelétrica a carvão mineral

Fonte: adaptado de IECM (2021)

Para o controle de NO_x pós-combustão, a opção disponível na versão 11.5 do IECM é uso de SCR, que é a tecnologia mais adequada a esse tipo de controle (IMPÉRIO, 2020; VERGNHANINI, 2016). Assim, foi selecionada essa tecnologia para a análise. Para controle de material particulado, as opções do modelo são o uso de filtros manga ou de ESP. A opção pelo ESP deu-se por sua maior eficiência e também pelo fato de essa tecnologia já ser utilizada na UTEJLC (KOEHLER; VIRMOND; AQUINO, 2017; MERSCHMANN *et al.*, 2013). No controle da emissão de SO₂, a versão usada do IECM disponibiliza as opções de FGD ou de calcário com spray dryer. A opção pelo FGD deu-se pelo fato de que o uso de calcário com spray dryer acarreta um produto sólido da dessulfuração, a ser recolhido junto com as cinzas volantes, o que poderia inviabilizar sua aplicação como insumo para a produção de zeólitas. As opções pela torre úmida para o sistema de arrefecimento e pelo tratamento químico da água deram-se seguindo o indicado por Merschmann *et al.* (2013) como os sistemas existentes no Complexo Jorge Lacerda. Para a disposição final das cinzas volantes, optou-se pela coleta em separado dos demais sólidos para que se possa encaminhá-las ao processo de síntese de zeólitas.

O combustível considerado no caso em estudo é o carvão mineral tipicamente utilizado para geração termelétrica na UTEJLC. As características físico-químicas consideradas para o combustível são apresentadas na Tabela 5.2 e na Tabela 5.3.

Tabela 5.2. Parâmetros físico-químicos considerados para o carvão mineral

Composição química	(%)
Carbono	46,31
Hidrogênio	3,35
Oxigênio	5,91
Cloro	0,00
Enxofre	1,97
Nitrogênio	0,99
Cinzas	39,90
Teor de umidade	1,58
Poder calorífico (base úmida)	18.870 kJ/kg

Fonte: Adaptado de Brown (2011)

Tabela 5.3. Parâmetros considerados para as cinzas do carvão mineral

Composição química	(%)
SiO ₂	45,88
Al ₂ O ₃	20,55
Fe ₂ O ₃	15,45
CaO	4,31
MgO	3,22
Na ₂ O	0,96
K ₂ O	1,67
TiO ₂	3,77
P ₂ O ₅	0,89
SO ₃	0,40
MnO ₂	0,00
Outros	2,90

Fonte: Adaptado de Aquino (2018)

O foco da presente análise está nos processos de geração termelétrica na planta base e na captura de CO₂ com adsorventes sólidos em um ciclo TSA. Os demais processos são acessórios ao escopo da análise. Portanto, os processos no escopo da análise foram detalhadamente parametrizados de acordo com o caso em análise, enquanto os demais processos foram parametrizados com valores *default* do modelo IECM 11.5. A Tabela 5.4 apresenta os parâmetros-chave para avaliação dos processos no escopo da análise.

Tabela 5.4. Parâmetros-chave para simulação da planta termelétrica a carvão mineral com captura de CO₂

Seção	Parâmetro	Valores	Fonte
Geral	Temperatura ambiente média	19 °C	Merschmann <i>et al.</i> (2013)
	Umidade relativa do ar	80%	Merschmann <i>et al.</i> (2013)
	Fator de capacidade	75%	IECM (2021) ²
Planta base	Potência bruta (MWg)	330	ANEEL (2023)
	Tipo de unidade	Subcrítica	Merschmann <i>et al.</i> (2013)
	Eficiência da caldeira	88,94%	Koehler, Virmond e Aquino (2017)
Captura de CO₂ em leito móvel com variação de temperatura (MBTSA)	Capacidade máxima de carregamento do adsorvente – q _{max} (mol CO ₂ /kg ads)	3,4	Li <i>et al.</i> (2009) ¹
	Parâmetro de Langmuir (1/Pa)	8,0 x 10 ⁻¹⁰	Li <i>et al.</i> (2009) ¹
	Entalpia de adsorção (kJ/kmol)	3,3 x 10 ⁴	Li <i>et al.</i> (2009) ¹
	Temperatura de operação da adsorção (°C)	53	IECM (2021) ²
	Temperatura de operação do regenerador (°C)	200	Morales-Ospino <i>et al.</i> (2021) ³
	Carga do adsorvente rico – q _{rich} (mol CO ₂ /kg ads)	2,2	IECM (2021) ⁴
	Carga do adsorvente pobre – q _{lean} (mol CO ₂ /kg ads)	0,49	IECM (2021) ⁴
Eficiência de captura	90%	IECM (2021) ²	

Notas:

- 1- Parâmetros referentes a zeólitas comerciais do tipo 13X, já que Aquino *et al.* (2020) relatam a síntese de zeólitas de cinzas com propriedades similares às comerciais.
- 2- Parâmetro default do modelo IECM.
- 3- De acordo com os autores, o uso de temperaturas mais elevadas na regeneração melhora a eficiência global da captura de CO₂ com pouco impacto na penalidade energética do processo, sobretudo se considerada a recuperação de energia térmica dos gases exaustos da combustão.
- 4- Cálculos internos do modelo IECM.

Fonte: Elaboração própria

A planta base da UTEJLC localiza-se no município de Capivari de Baixo, Santa Catarina, para o qual a temperatura ambiente média é de aproximadamente 19 °C e a umidade relativa do ar de 80% (KOEHLER; VIRMOND; AQUINO, 2017; MERSCHMANN *et al.*, 2013). A potência bruta da planta é de 330 MW, correspondente à potência outorgada da UTEJLC (ANEEL, 2023).

O carregamento do CO₂ pelos adsorventes sólidos no ciclo é determinado por um modelo de isotermas operantes nas condições de temperatura das zonas de adsorção e regeneração (ou dessorção). A modelagem de isotermas de adsorção de zeólitas 13X em geral utiliza o modelo de Sips, que combina os efeitos reportados nos modelos de Langmuir e Freundlich (DOS SANTOS *et al.*, 2021; GĘSIKIEWICZ-PUCHALSKA *et al.*, 2021; JOSS; GAZZANI; MAZZOTTI, 2017; LIU, R. S. *et al.*, 2021; MORALES-OSPINO *et al.*, 2021). Entretanto, o modelo de isoterma utilizado na arquitetura do

IECM é o modelo de Langmuir, representado matematicamente pela Equação 5-1 e pela Equação 5-2 (MANTRIPRAGADA; GLIER; RUBIN, 2017).

$$q_{rich/lean,eq} = q_{max} * \frac{b_{CO_2} * p_{CO_2}}{1 + b_{CO_2} * p_{CO_2}} \quad \text{Equação 5-1}$$

$$b_{CO_2} = b_0 * \exp \left(-\frac{\Delta h}{R * (T_{ads/regen} + 273,15)} \right) \quad \text{Equação 5-2}$$

Em que $q_{rich/lean,eq}$ é o carregamento de equilíbrio de CO₂ no adsorvente sólido nas etapas de adsorção (*rich*) ou de regeneração (*lean*) (mols/kg de sólido), q_{max} é o carregamento máximo de CO₂ em condições padrão (mols/kg de sólido), b_{CO_2} é o parâmetro de carregamento de Langmuir (1/Pa), p_{CO_2} é a pressão parcial de CO₂ (Pa), b_0 é a constante de Langmuir para o adsorvente sólido (1/Pa), Δh é a entalpia de reação (kJ/kmol CO₂), R é a constante universal dos gases (kJ/kmol CO₂) e $T_{ads/regen}$ é a temperatura da adsorção ou da regeneração (°C).

O processo considerado no IECM para captura de CO₂ pós-combustão com adsorventes sólidos por variação de temperatura (TSA) consiste no uso de uma combinação de reatores de adsorção e de regeneração, conforme ilustrado na Figura 5-3. Nesse esquema, é possível verificar que o gás exausto e rico em CO₂ adentra um leito móvel contendo o adsorvente sólido com seus poros vazios. A baixa temperatura de operação desse leito (~50°C) favorece a retenção por adsorção do CO₂ presente no gás exausto na superfície do adsorvente sólido (captura do CO₂). Após essa etapa, o gás praticamente livre de CO₂ segue para ser liberado na atmosfera, enquanto os sólidos com o CO₂ adsorvido são encaminhados para um segundo leito móvel, onde ocorre a dessorção, ou seja, a liberação do CO₂ adsorvido em sua superfície, por meio da elevação de sua temperatura (~180°C). Na sequência, os adsorventes sólidos, novamente livres de CO₂, são reencaminhados para o leito de adsorção para um novo ciclo de captura do CO₂. Vale ressaltar que parte da carga de adsorvente sólido é removida em uma purga a cada ciclo, em razão do desgaste mecânico e da perda de atividade química, sendo reposta uma quantidade equivalente de adsorvente fresco diretamente na entrada no leito de adsorção (*make-up*).

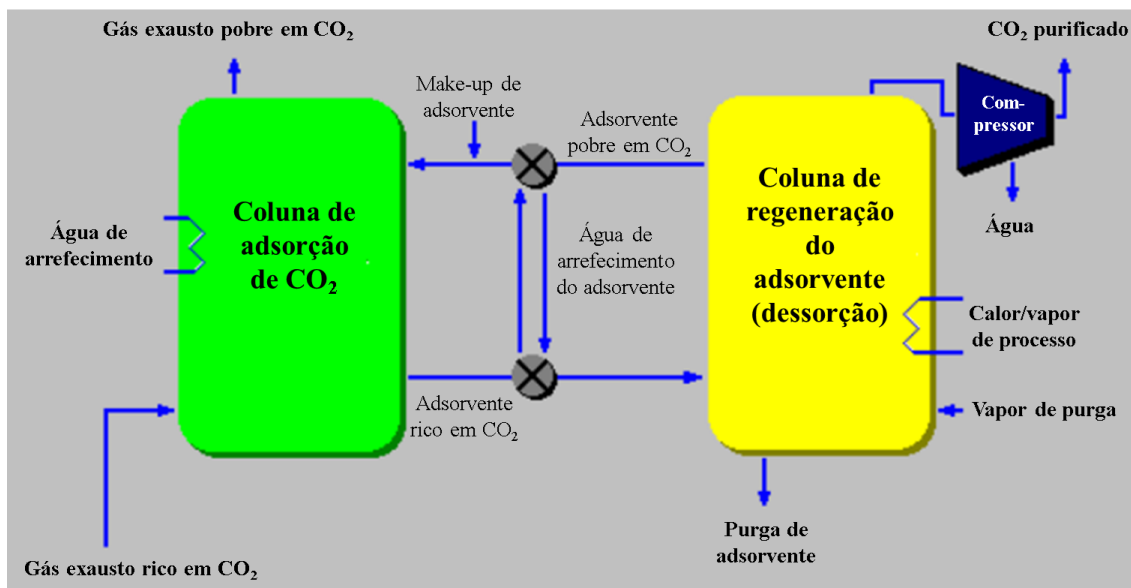


Figura 5-3. Esquema do processo considerado para a captura de CO₂ pós-combustão com adsorventes sólidos

Fonte: Adaptado de IECM (2021)

A penalidade energética do processo está associada principalmente ao fornecimento de energia térmica à coluna de regeneração do adsorvente. No IECM, assume-se que o aquecimento é realizado com vapor, que pode ser oriundo da caldeira principal ou de uma caldeira auxiliar. Na prática, uma das principais vantagens do uso do processo de captura de CO₂ com adsorventes sólidos por meio de TSA é a possibilidade de minimizar a penalidade por meio de integração energética. Dado que a coluna de regeneração opera em temperaturas moderadas, é possível utilizar correntes de calor residual de baixa de baixa qualidade como fonte de energia térmica para aquecimento da coluna de regeneração, tais como o próprio gás exausto da caldeira (JOSS; GAZZANI; MAZZOTTI, 2017; MORALES-OSPINO *et al.*, 2021), sendo esse um caso de particular interesse para compreensão do potencial benefício do uso de tais sistemas em comparação às demais opções para captura de CO₂ pós-combustão. Assim, considerou-se um caso base para o sistema TSA, em que o aquecimento da coluna de regeneração é feito por vapor oriundo da caldeira principal da planta, e um segundo caso do TSA otimizado, simulando que a demanda térmica para regeneração do adsorvente é integralmente atendida por calor residual dos gases de combustão da caldeira. Como, a versão 11.5 do IECM não apresenta essa possibilidade diretamente, a simulação desse caso de TSA otimizado deu-se assumindo uma caldeira suplementar de

custo nulo de capital e combustível para fornecimento da energia de recuperação do adsorvente.

Para fins de comparação, foram rodados dois outros casos da usina termelétrica a carvão mineral, sendo um sem qualquer sistema de captura de CO₂ e outro com um sistema de captura por absorção química com amina (MEA), considerado o atual benchmark tecnológico na cadeia de CCS²⁰ (FERON *et al.*, 2020). Para estes, foi assumida a mesma configuração de planta apontada na Tabela 5.1, variando apenas o item “sistema de captura de CO₂. Também foram considerados os mesmos parâmetros de simulação para as seções “Geral” e “Planta Base”, informados na Tabela 5.4, sendo os demais parâmetros considerados como os valores default do IECM 11.5. Assim, a Tabela 5.5 sumariza os casos rodados no IECM para simulação da usina termelétrica.

Tabela 5.5. Descrição dos casos de simulação das usinas termelétricas no IECM

Código do caso	Descrição
Sem CCS	Usina termelétrica sem unidade de captura de CO ₂ .
CCS TSA	Usina termelétrica com unidade de captura de CO ₂ via sistema TSA, com demanda térmica de regeneração do adsorvente atendida por vapor gerado na caldeira principal.
CCS TSA otm	Usina termelétrica com unidade de captura de CO ₂ via sistema TSA, com demanda térmica de regeneração do adsorvente atendida por fonte de calor residual da usina.
CCS ABS	Usina termelétrica com unidade de captura de CO ₂ via sistema de absorção química com amina (MEA), benchmark tecnológico ²⁰ .

Fonte: Elaboração própria

A etapa de simulação das UTEs a biomassa com captura de CO₂ via adsorção com as zeólitas de carvão mineral utiliza essencialmente a estrutura metodológica empregada na simulação de sua contraparte fóssil. Contudo, são realizadas adaptações à modelagem para representação de que o combustível empregado seja biomassa sólida ao invés de carvão mineral.

²⁰ Sobre o benchmark tecnológico para a captura de CO₂ pós-combustão, é importante ressaltar que o uso da tecnologia com MEA é considerado defasado, tendo em vista o desenvolvimento recente de outras tecnologias de absorção química com aminas. Particularmente, a tecnologia Cansolv vem sendo aplicada em importantes projetos de CCS em larga escala, indicando uma possível necessidade de revisão sobre o benchmark para estudos dessa natureza (FERON *et al.*, 2020).

A bioenergia termelétrica é simulada para dois tipos relevantes de biomassa sólida empregados na geração elétrica no Brasil: o bagaço de cana-de-açúcar e o resíduo de eucalipto. O bagaço de cana-de-açúcar é a principal fonte de geração termelétrica a biomassa no país, possuindo assim um elevado potencial para captura de CO₂ (ANEEL, 2023). No entanto, seu alto teor de umidade e o caráter sazonal de sua produção prejudicam o desempenho econômico da captura de CO₂ associada a sua queima (DA SILVA, F. T. F. *et al.*, 2018; TAGOMORI *et al.*, 2018; VALENTIM BASTOS *et al.*, 2022). Já os resíduos florestais oriundos do eucalipto são o principal tipo de biomassa lenhosa empregada na geração termelétrica no Brasil (ANEEL, 2023). Apesar de possuir menos capacidade instalada no país em relação ao bagaço de cana-de-açúcar, implicando em um menor potencial de captura de CO₂, a biomassa de eucalipto apresenta menor teor de umidade e maior facilidade de ser estocada, proporcionando uma geração contínua ao longo do ano (TAGOMORI; ROCHEDO; SZKLO, 2019).

A simulação das plantas termelétricas a biomassa utiliza a mesma configuração assumida para a planta a carvão mineral no IECM, apresentada na Tabela 5.1 e na Figura 5-2. As composições dos combustíveis de biomassa considerados no estudo e de suas cinzas são apresentadas na Tabela 5.6 e na Tabela 5.7, respectivamente.

Tabela 5.6. Parâmetros físico-químicos considerados para as biomassas avaliadas

Componente	Bagaço de cana-de-açúcar (%)	Resíduo de eucalipto (%)
Carbono	22,30	43,57
Hidrogênio	2,90	5,06
Oxigênio	22,25	38,70
Cloro	0,01	0,04
Enxofre	0,05	0,03
Nitrogênio	0,30	0,13
Cinzas	2,19	0,47
Teor de umidade	50,00	12,00
Poder calorífico (base úmida)	9.050 kJ/kg	16.910 kJ/kg

Fonte: Adaptado de Tagomori *et al.* (2018) e Tagomori (2017)

Tabela 5.7. Parâmetros considerados para as cinzas dos tipos de biomassa avaliados

Composição química	Bagaço de cana-de-açúcar (%)	Resíduo de eucalipto (%)
SiO ₂	45,88	2,82
Al ₂ O ₃	20,55	0,27
Fe ₂ O ₃	15,45	0,94
CaO	4,31	59,47
MgO	3,22	5,79
Na ₂ O	0,96	3,40
K ₂ O	1,67	10,67
TiO ₂	3,77	0,00
P ₂ O ₅	0,89	3,53
SO ₃	0,40	0,00
MnO ₂	0,00	0,00
Outros	2,90	13,11

Fonte: Adaptado de TNO (2023) e Zevenhoven-Onderwater *et al.* (2001)

Tal como para a planta a carvão, o foco da análise do sistema de geração termelétrica com bioenergia está na análise do processo de captura de CO₂, sendo os demais processos acessórios ao escopo do estudo. Assim, sendo, são utilizados os valores default do IECM para os processos fora do escopo. Para fins de comparação técnico-econômica, também é feita uma simulação para as plantas de BECCS com o uso da tecnologia de absorção química com aminas, considerada o benchmark atual entre as técnicas de captura de CO₂ pós-combustão (MIRZA; KEARNS, 2022). Para tanto, também são utilizados valores default do IECM. Os parâmetros-chave das simulações de plantas de BECCS são apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8. Parâmetros-chave para simulação das plantas de BECCS

Seção	Parâmetro	Planta a bagaço de cana-de-açúcar	Planta a resíduo de eucalipto	Fonte
Geral	Temperatura ambiente média	19 °C	19 °C	Merschmann <i>et al.</i> (2013)
	Umidade relativa do ar	80%	80%	Merschmann <i>et al.</i> (2013)
	Fator de capacidade	50%	75%	Tagomori (2017), Tagomori, Rochedo e Szklo (2019)
Planta base	Potência bruta (MWg)	100	100	ANEEL (2023)
	Tipo de unidade	Subcrítica	Subcrítica	Merschmann <i>et al.</i> (2013)
	Eficiência da caldeira	88,94%	88,94%	Koehler, Virmond e Aquino (2017)
Captura de CO₂ por adsorção com variação de temperatura (TSA)	Capacidade máxima de carregamento do adsorvente – q_{max} (mol CO ₂ /kg ads)	3,4	3,4	Li <i>et al.</i> (2009) ¹
	Parâmetro de Langmuir (1/Pa)	$8,0 \times 10^{-10}$	$8,0 \times 10^{-10}$	Li <i>et al.</i> (2009) ¹
	Entalpia de adsorção (kJ/kmol)	$3,3 \times 10^4$	$3,3 \times 10^4$	Li <i>et al.</i> (2009) ¹
	Temperatura de operação da adsorção (°C)	53	53	IECM (2021) ²
	Temperatura de operação do regenerador (°C)	200	200	Morales-Ospino <i>et al.</i> (2021) ³
	Carga do adsorvente rico – q_{rich} (mol CO ₂ /kg ads)	2,2	2,2	IECM (2021) ⁴
	Carga do adsorvente pobre – q_{lean} (mol CO ₂ /kg ads)	0,49	0,49	IECM (2021) ⁴
	Eficiência de captura	90%	90%	IECM (2021) ²
Captura de CO₂ por absorção química com solvente (benchmark)	Tipo de solvente utilizado na captura	MEA	MEA	Mirza e Kearns (2022)
	Eficiência de captura	90%	90%	IECM (2021) ²

Notas:

- 1- Parâmetros referentes a zeólitas do tipo 13X, já que Aquino *et al.* (2020) relatam a síntese de zeólitas de propriedades similares a partir de cinzas de carvão mineral.
- 2- Parâmetro default do modelo IECM.
- 3- De acordo com os autores, o uso de temperaturas mais elevadas na regeneração melhora a eficiência global da captura de CO₂ com pouco impacto na penalidade energética do processo, sobretudo se considerada a recuperação de energia térmica dos gases exaustos da combustão.
- 4- Cálculos internos do modelo IECM.

Fonte: Elaboração própria

Nota-se que os parâmetros apresentados na Tabela 5.8 são essencialmente os mesmos mostrados na Tabela 5.4, salvo algumas exceções pontuais. Uma delas é um menor fator de capacidade para a planta a bagaço, dado que se trata de um recurso sazonal, produzido apenas durante a safra da cana-de-açúcar e que possui dificuldades técnicas para armazenamento (DA SILVA, 2017; EBADIAN *et al.*, 2011; RENTIZELAS; TOLIS; TATSIPOULOS, 2009). Assim, considerou-se de forma conservadora que a planta opera apenas 50% do ano (TAGOMORI *et al.*, 2018). A

outra diferença dá-se nas potências das plantas-base arquetípicas de bioenergia, assumidas como 100 MW, o que é coerente com a escala típica das plantas termelétricas a biomassa de maior porte operantes no Brasil (ANEEL, 2023).

Visando também explorar as possibilidades tecnológicas do sistema de captura de CO₂ via rota TSA, é proposta a avaliação de quatro casos, seguindo a mesma lógica apresentada para a planta fóssil. A descrição dos casos simulados é a mesma apresentada na Tabela 5.5.

5.1.2 Simulação do processo de produção de zeólitas a partir de cinzas de carvão mineral

A produção de zeólitas sintéticas do tipo X a partir das cinzas de carvão mineral foi modelada com base no processo descrito em Aquino *et al.* (2020). A produção inicia-se pela mistura e moagem das cinzas com hidróxido de sódio, seguida por uma etapa de fusão a uma temperatura de 550 °C durante 1h. O produto é resfriado e novamente moído, seguindo para a adição de uma fonte de alumínio (NaAlO₂) e de água. A mistura é submetida a solubilização em um reator com agitação por 16 horas à temperatura ambiente e, posteriormente, a uma reação hidrotérmica por 24 horas a uma temperatura próxima a 90 °C para síntese das zeólitas. Na sequência, o produto é filtrado, lavado com água e seco em estufa a 100 °C. Finalmente, acrescenta-se um aglomerante para conformação das zeólitas em pellets, com o auxílio de uma extrusora. A Figura 5-4 traz um esquema das etapas do processo de síntese das zeólitas, na forma de um fluxograma.

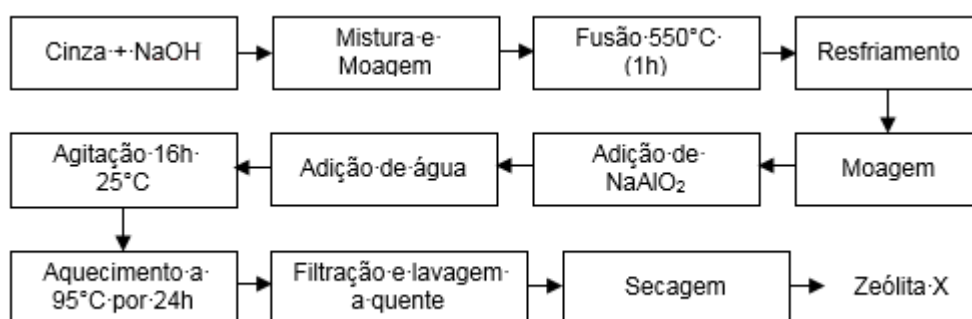


Figura 5-4. Fluxograma esquemático do processo de síntese das zeólitas X

Fonte: Aquino *et al.* (2017)

O dimensionamento dos equipamentos e os balanços de massa e energia utilizam como base o projeto elaborado e orçado pela SATC para comissionamento de uma planta piloto de produção de zeólitas X a partir de cinzas de carvão mineral (SATC, 2020). A partir daí, são estimados o custo de capital e os custos de operação e manutenção fixos e variáveis.

A Tabela 5.9 apresenta os parâmetros técnicos considerados para a produção das zeólitas na escala piloto, conforme o projeto elaborado pela SATC (2020). É importante ressaltar que as etapas de mistura e síntese hidrotérmica, realizadas sequencialmente em um mesmo reator, possuem um tempo de residência de 40 horas. Assumindo que houvesse apenas um único reator para tais operações, as demais instalações e a equipe de trabalho ficariam ociosas por grande parte do período produtivo, o que é indesejável para a operação industrial. Portanto, propõe-se alternativamente um modelo de operação melhorado, com cinco reatores operando de forma sincronizada, reduzindo o tempo médio de produção para 8 horas. A produção e os custos são adaptados para uma escala industrial compatível com a produção de cinzas estimada pela queima de carvão mineral na planta termelétrica simulada, descrita na seção 5.1.3.

Tabela 5.9. Parâmetros técnicos assumidos para a operação da planta de produção de zeólitas em escala piloto

Sistema de produção de zeólitas	Escala piloto	Escala piloto
	1 reator	5 reatores
Tipo de processo de produção	Batelada	Batelada
Capacidade (kg/batelada)	200	200
Trens de operação (reatores)	1	5
Janela de operação (h/ano)	8.000	8.000
Tempo médio de produção por batelada (h)	40	8
Número de bateladas por ano	1.000	1.000
Tempo de construção (anos)	1	1
Vida útil (anos)	20	20
Produção anual (t/ano)	40	200

Fonte: elaboração própria com base em SATC (2020)

A estimativa do custo de capital, que é um elemento fundamental para a etapa de análise técnico-econômica, parte da verificação dos equipamentos necessários para cada

operação unitária do processo de síntese das zeólitas X a partir de cinzas de carvão mineral. A Tabela 5.10 lista os equipamentos considerados por etapa do processo, com base no orçamento cedido pela SATC (2020) para sua planta piloto.

Tabela 5.10. Equipamentos industriais requeridos em cada etapa da produção de zeólitas

Equipamentos	Etapa do processo
Moinho Agitador e peneiras	Preparo das matérias primas
Forno Rotativo	Fusão das cinzas e do NaOH
Reator de mistura/reator hidrotermal Bombas Trocadores de calor Instrumentação e controle Estrutura para reservatórios de fluidos Reservatórios de fluidos de processo Reservatório de neutralização de efluentes	Síntese de zeólitas
Filtro prensa Estufa de bandejas Peletizador	Finalização do produto
Trave de sustentação Tambores de armazenamento de sólidos	Movimentação e armazenamento de sólidos

Fonte: Elaboração própria com base em SATC (2020)

O dimensionamento dos equipamentos e os balanços de massa e energia também utilizam como base o projeto elaborado e orçado pela SATC para comissionamento de uma planta piloto de produção de zeólitas X a partir de cinzas de carvão mineral (SATC, 2020). A demanda específica de cada insumo (matérias-primas e utilidades), oriunda dos balanços estimados para a planta piloto, é apresentada na Tabela 5.11.

Tabela 5.11. Demandas específicas de insumos para a produção de zeólitas X

Matérias-primas	
Insumo	Consumo por tonelada de produto
Cinzas de carvão mineral (kg)	850,00
Hidróxido de sódio (kg)	800,00
Aluminato de sódio (kg)	110,00
Utilidades	
Insumo	Consumo por tonelada de produto
Eletricidade (MWh)	1,3
Água da rede (m ³)	5,0

Fonte: Elaboração própria com base em SATC (2020).

5.1.3 Análise técnico-econômica dos sistemas

Para padronização da modelagem econômica, tomaram-se parâmetros comuns de avaliação em todas as etapas metodológicas. Foi usada uma taxa de desconto constante no valor de 8% ao ano, conforme utilizado em diversos trabalhos sobre mitigação de emissões de GEE no setor de energia (BORBA *et al.*, 2012; CORMOS, 2012; GLOBAL CCS INSTITUTE, 2019; IEA, 2020). Os valores de custos de equipamentos foram atualizados pelo índice resumido anual *Chemical Engineering Plant Cost Index* (CEPCI) para o ano de 2020 (CHEMICAL ENGINEERING, 2021), com auxílio da Equação 5-3. Sempre que aplicável, determinou-se o emprego de um Fator de Escala (FE) geométrico²¹ e um fator de trem de 0,9²². As taxas de câmbio de dólar e euro para real foram retiradas da página eletrônica do Banco Central do Brasil como a média para o ano de 2020, sendo os valores de 5,16 R\$/USD e 5,36 R\$/EUR, respectivamente (BACEN, 2023). O preço considerado para a energia elétrica foi de R\$ 240/MWh, valor arredondado do preço médio definido no leilão de energia nova A-5 da EPE realizado no ano de 2022 (EPE, 2022a). Para o gás natural, atribuiu-se um valor de R\$ 0,41/m³, em linha com os estudos da EPE para o Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 (PDE 2030) e o custo da água da rede foi considerado como a tarifa da companhia local de águas e saneamento para estabelecimentos industriais em 2020, de R\$ 12,18/m³ (CASAN, 2020). A Tabela 5.12 apresenta os parâmetros de auxílio aplicados na modelagem.

Tabela 5.12. Parâmetros econômicos auxiliares à modelagem

Parâmetro	Valor	Unidade	Fonte
Câmbio Real-Dólar ₂₀₂₀	5,16	BRL/USD	BACEN (2023)
Câmbio Real-Euro ₂₀₂₀	5,36	BRL/EUR	BACEN (2023)
Taxa de desconto	8	% a.a.	IEA (2020)

Fonte: Elaboração própria

²¹ O fator de escala geométrico equivale a 0,7. Trata-se da razão aproximada de dois terços, correspondente à relação entre os expoentes de cálculo da área e do volume. Representa, de forma simplificada, que o aumento das dimensões de um equipamento industrial impacta o custo proporcionalmente ao aumento da área, enquanto o ganho de capacidade é proporcional ao volume.

²² O uso de um fator de trem traz o significado de que o custo instalado de uma unidade de produção (trem) adicional a outra já existente do mesmo tipo para operação em paralelo é inferior ao da primeira unidade. Isso ocorre pois os trens adicionais podem partilhar dos equipamentos auxiliares e mão-de-obra de instalação empregados na unidade pioneira, além de poderem utilizar o projeto original como modelo para a manufatura dos equipamentos, implicando menos custos (SWANSON *et al.*, 2010).

$$V_{2020} = V_x * CEPCI_{2020} / CEPCI_x \quad \text{Equação 5-3}$$

Em que V_{2020} é o valor do parâmetro atualizado para o ano de 2020 [US\$]; V_x é o valor do parâmetro no ano da referência original [US\$]; $CEPCI_{2020}$ é o valor do índice para 2020 [-] e; $CEPCI_x$ é o valor do índice para o ano da referência original [-].

Quando necessário, os custos de operações industriais são estimados de forma compatível com um processo de *Front-End Loading* em nível conceitual (FEL-1), de acordo com as definições propostas no *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (GREEN, D. W.; PERRY, 2007). A metodologia de estimação de custos segue o processo adotado pelo National Energy Technology Laboratory (NETL), descrito em Theis (2019).

A metodologia do NETL considera cinco níveis de estimativas para o custo de capital (THEIS, 2019). O primeiro nível é o Custo da Planta Erguida (CPE), que contempla os custos de compra e instalação dos equipamentos de processo e auxiliares, incluindo os custos com trabalho direto e indireto. O segundo é o Custo de Engenharia, Compras e Construção (CECC), que inclui no CPE os custos com serviços especializados de planejamento e execução de projeto para a planta junto a uma empreiteira (EPC). O terceiro nível é o Custo Total da Planta (CTP), que inclui no CECC os custos de contingência de projeto (CProj) e dos processos (CProc). O quarto nível é o Custo Overnight Total (COT), que acrescenta ao CTP todos os demais custos overnight da planta (COvn), inclusive os custos do proprietário da planta. Por fim, o quinto nível de estimativa de custo de capital é o Custo Total Incorrido (CTI) que soma todos os gastos de capital à medida que são realizados durante o período de investimento, incluindo a escalada de preços (ECP) e os custos de financiamento durante construção (FIN). O conjunto de equações na sequência sistematiza matematicamente a formação dos diferentes níveis de estimativa de custo de capital.

$$CECC = CPE + EPC \quad \text{Equação 5-4}$$

$$CTP = CECC + CProj + CProc \quad \text{Equação 5-5}$$

$$COT = CTP + COvn \quad \text{Equação 5-6}$$

$$CTI = COT * (ECP + FIN) \quad \text{Equação 5-7}$$

Para fins de simplificação, as estimativas de custo de capital (CAPEX) realizadas neste estudo vão até o terceiro nível (CTP), guardando coerência com nível conceitual de projeto ora proposto. Portanto, faz-se necessário estimar os custos dos equipamentos instalados para determinação do CPE, uma parcela referente aos custos dos serviços de engenharia, compras e construção (EPC, da sigla em inglês), e valores para representação das contingências de projeto e de processos.

O CPE pode ser estimado com o auxílio de softwares para modelagem dos processos que contém bases de dados de custos de equipamento e instalação ou a partir de dados reais de orçamento de equipamentos para um projeto de planta industrial. A estimativa dos custos de EPC pode ser feita como um percentual do CPE, conforme é realizado pelo NETL, que considera um valor para o EPC entre 15% a 20% do CPE (THEIS, 2019).

As contingências são uma provisão para elementos imprevisíveis de custo em estimativas de investimento fixo, sendo seus valores intrinsecamente associados ao tipo de estimativa de custos realizada (GREEN, D. W.; PERRY, 2007). A contingência de processos representa as incertezas sobre o desempenho de um determinado processo produtivo, sendo maior quanto menor for o grau de maturidade tecnológica da referida operação, conforme ilustrado na Tabela 5.13. Já a contingência de projeto está associada às incertezas sobre o custo de capital estimado para o projeto, sendo menor o quanto maior for a qualidade da estimativa de custos. Para um tipo de análise preliminar de processo baseada em orçamentos, Theis (2019) recomenda o uso de um valor de contingência de projeto correspondente a uma fração de 15% a 30% da soma do CPE com o EPC e as contingências de projeto.

Tabela 5.13. Níveis de contingência de processo recomendados para o status da tecnologia empregada

Status Tecnológico	Contingência de Processo (%)
Novo conceito com dados limitados	> 40
Conceito com dados em escala bancada	30 - 70
Dados de pequena planta piloto	20 - 35
Módulos em tamanho completo operados	5 - 20
Processo utilizado comercialmente	0 - 10

Fonte: Adaptado de Theis (2019)

Os custos de operação e manutenção (OPEX) são compostos por uma parcela fixa ($OPEX_{fix}$) e outra variável ($OPEX_{var}$). O $OPEX_{fix}$ está relacionado aos dispêndios

operacionais que independem da quantidade produzida. É essencialmente composto por custos diretos, associados ao trabalho operacional, trabalho administrativo e de manutenção e suporte às operações da planta, e custos indiretos, referentes à depreciação dos equipamentos industriais.

A principal parcela dos custos diretos do $OPEX_f$ é o custo de trabalho com operadores (OL), que pode ser obtido de softwares de estimação de custos ou a partir de valores heurísticos que se baseiam no hardware da planta industrial. A Tabela 5.14 apresenta valores típicos para dimensionamento da equipe de trabalho tendo como base nos equipamentos previstos para a planta industrial, recomendados pelo *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (GREEN, D. W.; PERRY, 2007). Tais valores são adotados no presente trabalho para o dimensionamento de equipe de trabalho e custo, quando necessário, tendo como premissa de análise conservadora a utilização dos limites superiores nos casos de valores apresentados em faixas, arredondando-se para cima o número final de operadores indicado.

Tabela 5.14. Valores heurísticos para dimensionamento de equipe industrial

Tipos de equipamentos	Trabalhadores por unidade por turno
Ventiladores e compressor	0,1 – 0,2
Centrífuga	0,25 – 0,50
Cristalizador, mecânico	0,16
Secador	
Rotativos	0,5
Spray	1,0
Bandeja	0,5
Evaporador	0,25
Filtros	
Vácuo	0,125 – 0,250
Prensa	1,0
Rotativo	0,1
Trocadores de calor	0,1
Vasos de processo, torres (incluindo bombas e trocadores auxiliares)	0,2 – 0,5
Reatores	
Batelada	1,0
Contínuos	0,5

Fonte: Adaptado de Green & Perry (2007)

Ao valor de OL é acrescido um custo referente ao trabalho de supervisão dos operadores, cuja faixa recomendada pelo *Perry's Chemical Engineers' Handbook* é de um valor entre 30% e 40% do OL (GREEN, D. W.; PERRY, 2007). A soma do trabalho de supervisão ao OL forma o custo de trabalho operacional (CTO), sobre o qual incide

uma parcela de encargos de trabalho. Há ainda uma parcela de custos diretos diversos, ou miscelânea, referentes a despesas com suprimentos para os operadores, uniformes e lavanderia e com operações laboratoriais. Recomenda-se estimar tais despesas a partir do valor de OL, sendo aceitável um valor na faixa de 25% a 42% (GREEN, D. W.; PERRY, 2007). Os custos de manutenção, por sua vez, podem ser estimado a partir do custo de capital, sendo razoável algo entre 6% e 10% do custo de capital fixo (GREEN, D. W.; PERRY, 2007).

A depreciação representa o decaimento do valor dos equipamentos instalados na planta industrial em função de seu uso e desgaste ao longo do tempo de vida do projeto. Por exemplo, se a depreciação de um equipamento é de 90%, significa que ao fim de seu período de vida útil o equipamento terá um valor residual correspondente a 10% do valor original. A forma mais simples²³ de considerar a depreciação em uma análise econômica de um projeto é assumi-la como um custo operacional fixo, em que o valor do capital fixo deprecia linearmente ao longo do período de vida útil do projeto (GREEN, D. W.; PERRY, 2007).

Os parâmetros assumidos para as estimativas do OPEX_{fix} são apresentados na Tabela 5.15.

Tabela 5.15. Parâmetros utilizados para estimativa dos custos de operação e manutenção fixos

Parâmetro	Valor	Fonte
Salário de operador industrial	US\$ 461,32/mês US\$ 2,88/h	CNI (2023)
Supervisão	30% OL	GREEN & PERRY (2007)
Encargos de trabalho	40% CTO	GREEN & PERRY (2007)
Miscelânea	25% OL	GREEN & PERRY (2007)
Manutenção	8% CTP	GREEN & PERRY (2007)
Depreciação	100% CPE	GREEN & PERRY (2007)

Fonte: Elaboração própria

O OPEX_{var} é a parcela dos gastos que é modulada pela produção da planta, sendo formado sobretudo pelos custos com insumos para o processo na forma de matérias-

²³ Em termos tributários, a depreciação é uma dedução permitida pela autoridade tributária que permite que a perda do valor dos ativos possa ser abatida dos lucros da empresa e, conseqüentemente, dos impostos. Análises econômicas e financeiras mais detalhadas de projetos podem avaliar diferentes metodologias de depreciação para seus equipamentos industrial, podendo incluir possíveis benefícios fiscais oriundos de programas de depreciação acelerada (SOARES, J. B.; SZKLO; TOLMASQUIM, 2006).

primas e utilidades. Os preços padronizados de utilidades (energia e água) e matérias-primas são apresentados na Tabela 5.16.

Tabela 5.16. Preços padronizados para utilidades e matérias-primas nas simulações

Parâmetro	Valor	Unidade	Fonte
Preço da Eletricidade	46,51	US\$/MWh	EPE (2022a)
Preço do Gás Natural	0,08	US\$/m ³	EPE (2021b)
Preço da água da rede	2,36	US\$/m ³	CASAN (2020)
Preço de mercado das zeólitas ¹	5,04	US\$/kg	MADE-IN-CHINA (2023)
Custo das zeólitas de cinzas	0,69	US\$/kg	Estimativa própria
Preço da MEA	2,68	US\$/kg	IECM (2021)
Preço do hidróxido de sódio	0,52	US\$/kg	IECM (2021)
Preço do aluminato de sódio	0,42	US\$/kg	IECM (2021)

Notas:

1- Assumindo um sobrecusto de 80% sobre o preço FOB de 2,80 US\$/kg. Ver a nota de rodapé 27.

Fonte: Elaboração própria

A análise técnico-econômica do sistema é realizada a partir do cálculo do custo nivelado dos processos, tendo como base seu CAPEX e suas parcelas de OPEX, por meio da Equação 5-8. Particularmente, o custo da captura de CO₂ é estimado pela diferença das parcelas de custo calculadas para as respectivas usinas termelétricas com e sem a unidade de sequestro de carbono.

$$LC = \frac{(CAPEX * FRC + OPEX_{fix} + OPEX_{var})}{X} \quad \text{Equação 5-8}$$

Em que LC é o custo nivelado; CAPEX é o custo de capital; FRC é o fator de recuperação do capital²⁴; OPEX_{fix} é o custo de operação e manutenção fixo; OPEX_{var} é o custo de operação e manutenção variável e; X é a variável de nivelamento (produção mássica ou energética).

Nos casos em que há necessidade de adaptação de custos de processos a uma escala diferente daquela originalmente projetada, os cálculos são realizados com base na Equação 5-9 (GREEN, D. W.; PERRY, 2007).

$$A_2 = m. CAPEX * (R_2/R_1)^{0,7} + n. OPEX_{fix} * (R_2/R_1)^{0,25} + p. OPEX_{var} * (R_2/R_1) \quad \text{Equação 5-9}$$

²⁴ O FRC objetiva anualizar o investimento inicial com base na taxa de desconto definida e no tempo de duração do projeto. É calculado pela seguinte Equação: $FRC = \frac{r * (1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$, onde r é a taxa de desconto anual e n é a duração do projeto em anos.

Em que A_2 é o custo de manufatura anual na escala de produção 2 (\$/ano); R_1 é a escala de produção 1; R_2 é a escala de produção 2 e; m , n , p são constantes de ajuste de valores e unidades para cada termo da equação.

5.1.4 Análise de barreiras e de cobenefícios

A análise de barreiras segue a metodologia empregada em projetos de Avaliação de Necessidades Tecnológicas (TNA, do inglês *Technology Needs Assessment*) para avaliação de tecnologias climáticas inovadoras de mitigação e/ou adaptação (BOLDT *et al.*, 2012; DA SILVA, F. T. F. *et al.*, 2022; HASELIP *et al.*, 2019; RATHMANN; SCHAEFFER; RAJÃO; SZKLO; VINHOZA; NOGUEIRA; LUCENA; MARCOLINO; NUNES; *et al.*, 2021). Barreiras podem ser definidas como aspectos que afetam adversamente a completude de um objetivo, incluindo a ausência ou falha de mecanismos que poderiam prevenir tais efeitos indesejáveis (BOLDT *et al.*, 2012). Para melhor compreensão, as barreiras usualmente são classificadas em diferentes categorias. O relatório de um projeto TNA realizado para tecnologias climáticas de mitigação no Brasil (TNA_BRAZIL) apresenta as barreiras discriminadas em quatro categorias, nomeadamente: (i) técnica; (ii) econômica e de mercado; (iii) regulatória e institucional; e (iv) cultural e de capacitação (SCHAEFFER *et al.*, 2021). Assim, o presente trabalho adota a mesma categorização para o levantamento de barreiras. A definição para cada classe de barreira considerada neste trabalho é fornecida na Tabela 5.17.

Tabela 5.17. Definições das classes de barreiras

Classe	Definição	Exemplos
Técnica	Obstáculos associados à disponibilidade, eficácia ou viabilidade tecnológica	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de conhecimento científico • Penalidades energéticas • Nível de prontidão tecnológica
Econômica e de mercado	Desafios financeiros e de mercado que dificultam a implementação	<ul style="list-style-type: none"> • Custo de investimento • Condições de financiamento • Existência de demanda de mercado
Regulatória e institucional	Condições legais, políticas e institucionais desfavoráveis à implementação	<ul style="list-style-type: none"> • Arcabouço regulatório • Existência de políticas de incentivo • Presença de redes de cooperação institucional
Cultural e de capacitação	Questões sociais, comportamentais e de conscientização que afetam a adoção e implementação	<ul style="list-style-type: none"> • Conscientização pública sobre mudança do clima • Resistência a mudança nos processos de produção • Falta de capacitação ou treinamento adequado

Fonte: Elaboração própria

Cobenefícios, por sua vez, podem ser definidos como efeitos positivos e negativos, respectivamente, intencionais ou ancilares, oriundos da implementação de ações climáticas de mitigação (DENG *et al.*, 2017). Tratam-se de elementos relevantes para uma análise mais completa dos efeitos difusos da adoção de tecnologias de mitigação, para além das questões associadas a potencial e custo (BUSTAMANTE *et al.*, 2014; ÜRGE-VORSATZ *et al.*, 2014).

Uma forma sistemática e universal para análise de cobenefícios para soluções de mitigação das mudanças climáticas está na avaliação de seus efeitos sobre outros aspectos associados ao desenvolvimento sustentável. Atualmente, a principal diretriz global que versa sobre o amplo espectro de questões associadas ao desenvolvimento sustentável foi proposta pela ONU em 2015, no documento “Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável”, consolidando-as em 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ONU, 2015). De acordo com McCollum *et al.* (2018), os ODS representaram uma grande mudança no cenário político global enquanto sucessores dos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM). Os 17 ODS abrangem desde energia e clima; água, alimentos e ecossistemas; saúde e pobreza; até empregos e inovação, entre outros objetivos, enquanto os ODMs, para além de não serem universais em sua natureza, não abordavam várias dessas dimensões.

Nesse sentido, McCollum *et al.* (2018) propõem uma revisão sistemática de literatura para analisar as interconexões entre o Objetivo do Desenvolvimento Sustentável da ONU associado a energia limpa e acessível (ODS 7) com os demais ODS, visando avaliar a natureza e a força das interações e apontar caminhos para a formulação de políticas públicas, entre outros aspectos. Tal formulação de interconexões entre os ODS foi posteriormente utilizado como base para uma avaliação similar no Relatório Especial sobre Aquecimento Global de 1,5°C do IPCC (SR1.5), porém relacionando as interconexões do ODS 13, sobre ação contra a mudança global do clima, com os demais ODS (IPCC, 2018). Assim, o presente trabalho propõe uma análise de cobenefícios baseada na interação do sistema proposto para mitigação com os demais ODS, utilizando como base as discussões do supracitado relatório do IPCC (2018), particularmente aquelas associadas à captura de CO₂ em usinas fósseis e de bioenergia.

5.2 Resultados e discussões

5.2.1 Simulações da planta termelétrica a carvão mineral e potencial de produção de zeólitas de cinzas

Os resultados obtidos das simulações da planta termelétrica a carvão mineral no IECM 11.5 para os quatro casos considerados são apresentados na Tabela 5.18.

Tabela 5.18. Parâmetros técnicos obtidos dos casos simulados da planta termelétrica a carvão mineral

Parâmetros simulados	Sem CCS	CCS TSA	CCS TSA otm	CCS ABS
Consumo de carvão (kt/ano)	914,5	1.063,8	914,5	1.150,5
Energia elétrica líquida (GWh/ano)	1.986	1.721	1.755	1.627
Eficiência energética	41,4%	30,9%	36,6%	27,0%
Potência elétrica bruta (MWg)	330,0	330,0	330,0	330,0
Autoconsumo da planta base (MW)	28,0	37,8	37,0	42,0
Consumo planta CCS (MW)	-	0,8	0,7	8,5
Consumo compressão do CO ₂ (MW)	-	29,5	25,4	32,0
Potência elétrica líquida (MWg)	302,0	261,8	266,9	247,5
CO ₂ capturado (ktCO ₂ /ano)	-	1.646,3	1.414,8	1.783,0
Emissão residual (ktCO ₂ /ano)	1.572,0	182,9	157,2	198,1
Emissão específica (tCO ₂ /GWh)	791,7	106,3	89,6	121,7
Geração de cinzas volantes (t/h)	45,2	52,6	45,2	56,8
Geração de cinzas de fundo (t/h)	11,1	12,9	11,1	14,0
Geração de cinzas total (kt/ano)	370,0	430,5	370,0	465,6
Fluxo interno de zeólitas pobres (t/h)	-	3.643,0	3.137,0	-
Taxa de reposição de zeólitas (t/h)	-	1,25	1,08	-
Potencial de produção de zeólitas (kt/ano)	425	500	425	525
Autoconsumo de zeólitas (kt/ano)	-	8,2	7,1	-

Fonte: Elaboração própria

O consumo de carvão mineral simulado para a planta sem captura de CO₂ equivale a 914 mil toneladas anuais, inferior ao consumo verificado na UTEJLC em 2020, que foi de 1,083 milhão de toneladas de carvão (CCEE, 2020), ainda que o fator de capacidade considerado na simulação, de 75%, seja superior ao observado na unidade real, estimado em 63% em 2020 (IEMA, 2022). Outrossim, a geração elétrica simulada para a planta sem CCS foi de 1.986 GWh/ano, enquanto a geração observada em 2020 na UTEJLC foi de 1.441 GWh (IEMA, 2022). Tal diferença evidencia a baixa eficiência energética auferida pela UTEJLC, estimada em 32,1% na média de 2020 (IEMA, 2022),

em relação a uma típica planta termelétrica a carvão pulverizada greenfield moderna, calculada em 41,4% para o caso avaliado sem a captura de CO₂.

Curiosamente, os parâmetros de consumo de carvão, geração elétrica e eficiência energética observados para a UTEJLC em 2020 guardam maior semelhança com o caso simulado para uma termelétrica moderna com captura de CO₂ via sistema de TSA. A eficiência energética simulada para o caso em questão é de 30,9%, apenas 1,2% menor que a média da UTEJLC em 2020 (IEMA, 2022). Assim, as perdas energéticas na planta existente devem ser da mesma magnitude das perdas em uma planta nova com captura de CO₂ com sistema de TSA.

Otimizando a planta de captura de CO₂ com o reaproveitamento de calor residual para regeneração do adsorvente (caso CCS TSA otm), verifica-se uma considerável redução da penalidade de eficiência energética em relação à planta simulada sem sistema de CCS, de 10,5% para apenas 4,8%. Além disso, a eficiência simulada chega a ser superior ao valor médio observado para a UTEJLC em 2020, com uma diferença de 4,5%, ou seja, proporciona a geração de mais eletricidade anualmente mesmo com o sistema de captura de CO₂ instalado.

Já a simulação da planta com sistema de captura de CO₂ por absorção química (CCS ABS), considerado o atual *benchmark* tecnológico, apresentou a mais baixa eficiência energética dentre os casos simulados, com o maior consumo de carvão e a menor geração elétrica líquida anual. A parte de movimentação dos sólidos corresponde a um desvio ínfimo de potência elétrica para as unidades de captura de CO₂ do tipo TSA, mas os equipamentos de fluxo de uma unidade típica de absorção requerem um uso de maior de potência. Além disso, há tipicamente uma maior necessidade de suprimento de energia para regeneração do material absorvedor (MEA) em relação aos adsorventes (BUI *et al.*, 2018; QUADER *et al.*, 2015). Não obstante, há uma demanda térmica também considerável para regenerar o adsorvente nas plantas TSA, porém com a possibilidade de ser atendida por correntes quentes residuais de baixa qualidade da própria usina termelétrica. A diferença de eficiência simulada entre os casos CCS TSA e CCS TSA otm, de 5,7%, evidencia a vantagem do uso de correntes térmicas residuais para atendimento da demanda de energia para regeneração do adsorvente em plantas TSA.

Além da maior penalização energética per se, o requerimento de um maior uso combustível na caldeira para atendimento da demanda para regeneração do material de carregamento do CO₂ resulta em um maior volume de CO₂ gerado e, conseqüentemente, em uma maior demanda para compressão do fluxo gasoso obtido na corrente purificada de gás carbônico. Corroborando com os resultados apresentados na Tabela 5.18, estudos na literatura científica mostram que, de fato, a compressão do CO₂ a um nível de pressão adequado para transporte em redes dutoviárias é uma operação intensiva em consumo elétrico (DA SILVA, F. T. F. *et al.*, 2018; DE C. MERSCHMANN; SZKLO; SCHAEFFER, 2016).

Nesse sentido, o caso CCS ABS apresenta também a maior taxa de CO₂ capturado dentre as simulações incluindo o sistema de captura de CO₂, assim como a maior taxa de emissões residuais. Assim, o caso simulado que apresenta o menor indicador de emissão específica, dada pela razão entre a emissão residual e a geração elétrica líquida, foi o CCS TSA otm, seguido do CCS TSA e, por fim, do atual benchmark tecnológico. Contudo, é importante ressaltar que todas as termelétricas simuladas com sistema de captura de CO₂ apresentam reduzidas taxas de emissão específica, que chegam a quase um quinto da taxa de emissão média de 422 tCO₂/GWh para termelétricas de ciclo combinado a gás natural de serviço público do SIN em 2020, que são a tipologia de usina termelétrica fóssil menos emissora por unidade de energia elétrica gerada (IEMA, 2022).

Com respeito às cinzas, há uma óbvia relação entre o consumo de carvão e a geração de cinzas nos casos simulados. Os valores totais de cinzas geradas entre os casos variam de 370 a 465 mil toneladas por ano, valores muito superiores à demanda referente a uma planta de produção de zeólitas X na escala industrial considerada no estudo²⁵, de 25 mil toneladas por ano. A quantidade de cinzas gerada apenas na termelétrica a carvão mineral simulada seria suficiente para abastecer de 17 a 21 plantas industriais, podendo produzir de 425 a 525 mil toneladas de zeólitas X a cada ano.

No que concerne o autoconsumo de zeólitas para alimentação da captura de CO₂ com sistema TSA é considerado, verifica-se uma demanda anual de 8,2 e 7,1 mil

²⁵ Trata-se da escala da única planta de produção comercial de zeólitas sintéticas no Brasil, da FCCSA (ABIQUIM, 2017; ANTUNES *et al.*, 2000).

toneladas por ano para os casos CCS TSA e CCS TSA otm, respectivamente. Isso representa um valor de autoconsumo absolutamente irrisório frente ao potencial absoluto de produção de zeólitas a partir da totalidade de cinzas produzidas na termelétrica, mas de 28% a 33% da produção de uma única planta na escala industrial considerada. Assim, mesmo descontando o autoconsumo das plantas de captura de CO₂, haveria ainda um considerável excedente da produção zeolítica para ser destinada ao mercado em aplicações de captura de CO₂-TSA em outras indústrias ou mesmo para outros usos aos quais o produto se adequa, como em catálise, na produção de detergentes ou em fertilização, na agricultura.

5.2.2 Simulação da captura de CO₂ em usinas termelétricas a biomassa

Os resultados dos casos simulados para os arquétipos das usinas termelétricas a biomassa a bagaço de cana-de-açúcar e a resíduos de eucalipto com captura de CO₂ com processo TSA pelo IECM 11.5 são apresentados na Tabela 5.19 e na Tabela 5.20, respectivamente.

Tabela 5.19. Parâmetros técnicos obtidos dos casos simulados da planta termelétrica a bagaço de cana-de-açúcar

Parâmetros simulados	Sem CCS	CCS TSA	CCS TSA otm	CCS ABS
Consumo de biomassa (kt/ano)	554,9	823,1	554,9	789,4
Energia elétrica líquida (GWh/ano)	375,7	274,4	305,7	250,8
Eficiência energética	26,9%	13,3%	21,9%	12,6%
Potência elétrica bruta (MWg)	100,0	100,0	100,0	100,0
Autoconsumo da planta base (MW)	14,3	20,6	18,9	22,3
Consumo planta CCS (MW)	-	0,5	0,4	4,8
Consumo compressão do CO ₂ (MW)	-	16,3	11,0	15,6
Potência elétrica líquida (MWg)	85,7	62,6	69,8	57,2
CO ₂ capturado anualmente (kt)	-	605,7	408,4	580,7
Emissão específica ¹ (tCO ₂ /MWh)	-	-2.207	-1.336	-2.316
Fluxo interno de zeólitas pobres (t/h)	-	2.025,0	1.366,0	-
Taxa de reposição de zeólitas (t/h)	-	0,7	0,5	-
Consumo de zeólitas X (kt/ano)	-	3,0	2,0	-

Notas:

1- A emissão específica das plantas termelétricas a biomassa é obtida pela razão entre a quantidade de CO₂ capturada e a geração elétrica líquida da planta, em base anual. O valor negativo denota que a planta remove CO₂ da atmosfera.

Fonte: Elaboração própria

Tabela 5.20. Parâmetros técnicos obtidos dos casos simulados da planta termelétrica a resíduos de eucalipto

Parâmetros simulados	Sem CCS	CCS TSA	CCS TSA otm	CCS ABS
Consumo de biomassa (kt/ano)	376,9	475,0	376,9	523,5
Energia elétrica líquida (GWh/ano)	587,4	475,9	497,7	429,5
Eficiência energética	33,2%	21,3%	28,1%	17,5%
Potência elétrica bruta (MWg)	100,0	100,0	100,0	100,0
Autoconsumo da planta base (MW)	10,7	15,0	14,3	17,7
Consumo planta CCS (MW)	-	0,3	0,3	3,5
Consumo compressão do CO ₂ (MW)	-	12,3	9,7	13,5
Potência elétrica líquida (MWg)	89,3	72,4	75,7	65,3
CO ₂ capturado anualmente (kt)	-	682,4	541,4	752,8
Emissão específica ¹ (tCO ₂ /MWh)	-	-1.434	-1.088	-1.753
Fluxo interno de zeólitas pobres (t/h)	-	1.528,0	1.212,0	-
Taxa de reposição de zeólitas (t/h)	-	0,5	0,4	-
Consumo de zeólitas X (kt/ano)	-	3,4	2,7	-

Notas:

1- A emissão específica das plantas termelétricas a biomassa é obtida pela razão entre a quantidade de CO₂ capturada e a geração elétrica líquida da planta, em base anual. O valor negativo denota que a planta remove CO₂ da atmosfera.

Fonte: Elaboração própria

Na comparação entre os casos simulados, nota-se que a inclusão da captura de CO₂ resulta em um incremento substancial do consumo mássico de biomassa, em base úmida, nas plantas termelétricas. A exceção é o caso CCS TSA otm, em que a demanda por energia térmica para regeneração do adsorvente é integralmente atendida por fluxos de calor residual da própria usina, resultando em menor impacto sobre a eficiência energética da geração termelétrica. Para os demais, o aumento do consumo de biomassa é mais pronunciado na usina a bagaço de cana-de-açúcar, chegando a ser mais de 48% superior ao caso base, quando da adoção da tecnologia TSA. Já para a termelétrica a resíduos de eucalipto, o aumento do consumo de biomassa em relação ao caso base é maior com a adoção da tecnologia de absorção química, superando-o em aproximadamente 39%.

Tais diferenças estão associadas ao poder calorífico inferior assumido para os combustíveis, que é consideravelmente menor para o bagaço do que para o eucalipto, dada a diferença no teor de umidade dos combustíveis, vistos na Tabela 5.6. Com isso, requer-se uma queima suplementar de biomassa na caldeira principal superior no caso da usina a bagaço do que na usina a eucalipto para atendimento da demanda térmica de regeneração da substância de carregamento do CO₂ (adsorvente/absorvente), o que por

sua vez impacta todo o balanço da planta a jusante²⁶. No caso da usina a eucalipto, o impacto da inclusão do sistema de captura de CO₂ tem menor magnitude, já que se trata de um combustível com maior densidade energética.

Comparando os sistemas de captura de CO₂ nos casos CCS TSA e CCS ABS, verifica-se que mesmo na planta a bagaço em que o consumo de biomassa é superior para o sistema TSA, a eficiência energética é menor para o uso da tecnologia *benchmark* de absorção química na comparação com a adsorção por variação de temperatura. Isso ocorre devido ao maior consumo parasítico de potência que a termelétrica apresenta com a adoção da tecnologia de absorção química para captura de CO₂ em relação ao sistema TSA. Assim, em ambas as plantas os casos com sistemas de captura com tecnologia TSA apresentam maior geração elétrica líquida anual em comparação à tecnologia *benchmark* de absorção química.

No que concerne ao volume de CO₂ sequestrado, os casos simulados para as plantas com sistema de captura que demandam mais biomassa apresentam maior potencial de captura anual, dado que se determina previamente o nível de captura como um fator fixo de 90% do montante do gás gerado na termelétrica. É possível observar que as plantas a resíduos de eucalipto simuladas tendem a apresentar maior volume de captura anual em relação às plantas a bagaço, em função do maior fator de capacidade considerado. Quanto à emissão específica, nota-se que, nos casos estudados para as plantas termelétrica a biomassa, há uma relação inversa do valor absoluto do parâmetro com a eficiência energética, ou seja, quanto menos eficiente é a planta, mais remoção de carbono da atmosfera ela tende a apresentar por unidade de energia gerada. Assim sendo, as plantas a bagaço apresentam tipicamente maior valor absoluto de emissão específica que as plantas a resíduos de eucalipto.

Sobre o consumo de zeólitas, as plantas a bagaço com captura de CO₂ TSA possuem tipicamente um maior fluxo operativo de adsorvente em comparação às plantas a resíduo de eucalipto, dado que precisam lidar com um fluxo material

²⁶ Uma forma simples para compreender tal impacto da inclusão da captura de CO₂ sobre o balanço da planta é considerar o próprio sistema de captura. Dado o consumo suplementar de biomassa para atendimento de sua demanda térmica, o sistema passa a ter que lidar com um fluxo maior de gases de queima. Assim, faz-se necessário o dimensionamento de unidades de captura de CO₂ maiores, levando a um maior consumo parasítico da potência gerada pela usina termelétrica.

consideravelmente superior. Não obstante, o consumo anual das plantas a eucalipto é superior em função do maior fator de capacidade considerado. Na comparação entre os casos, é possível verificar que o sistema TSA otimizado para reaproveitamento de calor residual apresenta uma menor demanda por zeólitas nos dois tipos de planta estudados, já que há a necessidade de lidar com um fluxo menor de gases de queima de biomassa.

Nesse sentido, uma unidade industrial de produção de zeólitas típica, assim como definida na seção 5.2.1, poderia atender a um número maior de plantas de bioenergia com sistema TSA otimizado. Para plantas a bagaço, estima-se que uma planta industrial de zeólitas poderia atender às necessidades de 8 e 12 usinas termelétricas arquetípicas com captura de CO₂ sem e com a recuperação de calor residual no sistema TSA, respectivamente. Já para termelétricas a resíduos de eucalipto, seria possível atender a 7 e 9 plantas. Ou seja, cada unidade industrial de produção de zeólitas possibilitaria a instalação de sistemas de BECCS com tecnologia TSA em uma potência equivalente a 700 MW a 1,2 GW de usinas termelétricas a biomassa, proporcionando um montante de emissões negativas equivalente a cerca de 4,8 milhões de toneladas de CO₂ anualmente.

Atualmente, em 2023, o Sistema Interligado Nacional (SIN) conta com aproximadamente 16,6 GW de potência instalada de usinas termelétricas a biomassa, que representam 8,6% da capacidade de geração do Brasil (ANEEL, 2023). Desta capacidade, 12,1 GW vêm de usinas termelétricas a bagaço de cana-de-açúcar e menos de 0,7 GW de usinas termelétricas a resíduos florestais, que incluem o eucalipto (ANEEL, 2023). Sendo assim, a alocação da produção de zeólitas X de uma unidade industrial representaria a instalação de sistemas de captura de CO₂ com tecnologia TSA em 4% a 7% da capacidade instalada de geração termelétrica a biomassa no Brasil.

Considerando o potencial global de produção de zeólitas sendo alocado para usinas com BECCS com tecnologia TSA, seria possível atender à demanda de 125 a 268 plantas de bioenergia, representando uma capacidade instalada de 12,5 GW a 26,8 GW de potência bruta. Com isso, o potencial de BECCS do sistema seria equivalente a 87 a 109 milhões de toneladas de CO₂ anuais. As projeções do Plano Nacional de Energia – 2050 indicam um aumento da capacidade instalada de termelétricas a biomassa para até 29 GW em 2050, em um cenário em que a capacidade de geração brasileira alcança a ordem de 480 GW (EPE, 2020). Portanto, alocar a usinas com BECCS a totalidade do

excedente de zeólitas X potencialmente produzidas das cinzas geradas em uma única termelétrica a carvão mineral com captura de CO₂ de capacidade similar à UTEJLC representaria implementar unidades de captura de CO₂ em ao menos 43% de toda a potência instalada de bioenergia no Brasil em 2050, podendo chegar em até 92%. Sendo assim, a implantação de um sistema para aplicação integral do excedente de produção de zeólitas X das cinzas de carvão mineral em plantas de BECCS mostra-se desafiador, face as perspectivas de expansão da termelétricidade a biomassa no país.

Por outro lado, conforme apontado na seção 5.2.1, a termelétrica fóssil geradora das cinzas apresenta emissões residuais na ordem de 183 mil toneladas de CO₂, o que corresponde a menos de 0,2% do potencial de remoção de CO₂ do sistema.

A despeito do quadro desafiador pelo lado da oferta de bioenergia, a análise pela ótica da demanda por remoção de carbono da atmosfera apresenta um quadro ainda mais ilustrativo da magnitude do desafio climático. Köberle *et al.* (2020) apontam que, para um cenário em que o aumento da temperatura global se mantenha inferior a 1,5°C acima do nível pré-industrial até 2050, cabe ao Brasil a implantação de sistemas de remoção de carbono capazes de prover anualmente cerca de 70 MtCO₂ em 2030, 620 MtCO₂ em 2040 e 1.070 MtCO₂ em 2050, sendo que 75% das emissões negativas são providas por BECCS neste último ano. Assim, a capacidade do sistema proposto para aproveitamento das cinzas de uma termelétrica a carvão mineral para captura de CO₂ em termelétricas a biomassa, mesmo ocupando até 92% da capacidade projetada para as usinas do tipo em 2050, tem capacidade de proporcionar apenas cerca de 10% do montante das emissões negativas, ou menos de 14% da capacidade de BECCS, que se fazem necessárias para cumprimento dos objetivos climáticos mais estritos alinhados ao Acordo de Paris.

5.2.3 Análise técnico-econômica do sistema

A Tabela 5.21 apresenta os componentes de custo da produção de zeólitas X das cinzas de carvão mineral, considerando a escala piloto e a industrial. Um maior detalhamento dos custos é apresentado no Apêndice A.

Tabela 5.21. Componentes de custo do processo de produção de zeólitas

Componentes de custo		Produção de zeólitas		
		<i>Escala piloto 1 reator</i>	<i>Escala piloto 5 reatores</i>	<i>Escala industrial</i>
Capital (MUS\$ ₂₀₂₀)	CPE	0,24	0,72	21,01
	EPC	0,05	0,14	4,20
	Contingência de Processo	0,01	0,01	0,19
	Contingência de Projeto	0,06	0,17	5,08
	CTP	0,36	1,04	30,49
Total anualizado (MUS\$/ano)		0,04	0,11	3,11
O&M fixo (MUS\$/ano)	Trabalho	0,09	0,20	0,72
	Manutenção	0,03	0,08	2,44
	Depreciação	0,01	0,04	1,05
	Total	0,13	0,32	4,21
O&M variável (MUS\$/ano)	Eletricidade	0,00	0,01	1,49
	Make-up de água	0,00	0,00	0,19
	Hidróxido de sódio	0,01	0,06	7,00
	Cinzas	0,00	0,00	0,12
	Fonte de alumínio	0,00	0,01	1,16
	Total	0,02	0,08	9,96
Produção (t/ano)		40	200	25.000
CUSTO NIVELADO DE PRODUÇÃO (US\$/kg)		4,50	2,54	0,69

Fonte: Elaboração própria

Conforme esperado, observa-se uma clara redução no custo de produção das zeólitas X à medida que o nível de produção aumenta. Inicialmente, ao utilizar cinco reatores operando em paralelo em vez de um único reator, há um impacto significativo, especialmente devido à diminuição da participação dos custos fixos de operação e manutenção (O&M) no custo total, que é fortemente influenciado pelos custos de mão de obra. Isso ocorre devido à necessidade de empregar mão de obra em um processo com um tempo de batelada prolongado, resultando em uma grande ociosidade dos

trabalhadores durante o período de reação de síntese. A inclusão de novos reatores para operação em paralelo reduz essa ociosidade da mão de obra, resultando também na redução do desequilíbrio dos custos de produção das zeólitas X atribuídos ao trabalho.

Ao fazer a transição da escala de produção piloto para a escala industrial, é observada outra queda significativa no custo de produção das zeólitas X. Nessa etapa, os custos de capital e os custos fixos de operação e manutenção (O&M) tornam-se menos relevantes na formação do custo total do produto. Por outro lado, a parcela de O&M variável passa a ser predominante, representando 58% do custo de produção das zeólitas X. Dentro dessa parcela, destaca-se o custo associado ao hidróxido de sódio, que corresponde a 41% do custo total de produção das zeólitas X. Assim, reduzir a quantidade desse insumo utilizado na produção industrial das zeólitas X tem um potencial considerável para diminuir os custos de produção. Portanto, é de grande interesse realizar análises mais detalhadas do processo de produção das zeólitas X no futuro, com foco específico na otimização do uso de soda cáustica durante o processo.

Os valores obtidos para o custo de produção das zeólitas X a partir das cinzas de carvão mineral alinham-se a resultados de estudos que avaliaram sistemas similares. Hong *et al.* (2017) avaliaram a produção de zeólitas tipo A em uma escala industrial para processamento de 40 kt/ano de cinzas volantes de carvão, obtendo um preço mínimo de venda de 0,71 US\$/kg de zeólitas. Białocka *et al.* (2022) obtiveram um custo de produção de 0,23 US\$/kg de zeólitas X para uma avaliação técnico-econômica da produção em uma escala de 3,75 kt/ano de zeólitas a partir de cinzas de carvão. Em escala laboratorial, Zgureva e Boycheva (2015) encontraram custos de conversão de cinzas de carvão em zeólitas X na faixa de 3,05 a 7,30 US\$/kg de zeólitas, utilizando diferentes métodos de síntese.

Com relação ao mercado, há uma grande variabilidade no preço de zeólitas em função de sua qualidade e tipo de uso pretendido (HONG, J. L. X. *et al.*, 2017). Em uma pesquisa de mercado²⁷, verifica-se um preço FOB típico de 2,80 US\$/kg de zeólitas do tipo 13X para compras em uma quantidade mínima de 1 tonelada. Assumindo um

²⁷ Pesquisa realizada no site de fornecedores globais Made-in-China.com. <<https://pingxiangnaike.en.made-in-china.com/product/KdOTuclvkRUs/China-Factory-Price-Sphere-1-6-2-5-mm-Zeolite-13X-XP-Molecular-Sieve-for-Adsorbent-Drying.html>>. Acesso em 28/06/2023.

sobrecusto de 80% referente a taxas de importação, transporte e seguro da carga²⁸, o custo das zeólitas para indústrias no Brasil equivale a 5,04 US\$/kg. Considerando que a produção de zeólitas X a partir de cinzas de carvão mineral em escala industrial tem custo estimado em 0,69 US\$/kg, trata-se de uma oportunidade para desenvolvimento de uma indústria local competitiva, proporcionando a geração de emprego e renda para as regiões detentoras de recursos carboníferos no país de forma alternativa à venda de eletricidade oriunda da queima do carvão. Para tanto, requer-se também o desenvolvimento de mercados para as diversas potenciais aplicações das zeólitas, sendo um dos caminhos possíveis o desenvolvimento da captura de CO₂ em usinas termelétricas por adsorção com zeólitas.

A Tabela 5.22 mostra os custos obtidos da simulação da usina termelétrica fóssil para os diferentes casos avaliados. Um maior detalhamento dos custos pode ser verificado no Apêndice A.

²⁸ Essa estimativa de sobrecusto decorre de relatos da equipe da SATC a respeito de sua experiência na importação de zeólitas da China para rodar testes na planta piloto de captura de CO₂ com tecnologia TSA (SATC, 2020).

Tabela 5.22. Componentes de custo dos casos simulados para a usina termelétrica a carvão mineral

Componentes de custo		Sem CCS	CCS TSA	CCS TSA otm	CCS ABS
Capital (MUS\$ ₂₀₂₀)	CPE	490,51	812,20	777,64	736,62
	EPC	98,10	162,44	155,53	147,32
	Contingência de Processo	35,32	58,48	55,99	53,04
	Contingência de Projeto	124,78	206,62	197,83	187,40
	CTP	748,71	1.239,74	1.186,99	1.124,37
Total anualizado (MUS\$/ano)		66,51	110,12	105,44	99,88
O&M fixo (MUS\$/ano)	Trabalho	2,05	2,23	2,23	2,23
	Manutenção	15,00	25,89	24,29	23,60
	Depreciação	16,35	27,07	25,92	24,55
	Total	33,40	55,19	52,44	50,38
O&M variável (MUS\$/ano)	Combustível	56,91	66,22	56,91	71,61
	Utilidades	1,78	0,13	2,00	2,08
	Outros	10,19	14,62	13,13	18,93
	Make-up de adsorvente/solvente ¹	0,00	5,69	4,89	11,83
	Total	68,88	86,66	76,94	104,45
LCOE (US\$/MWh)		85,00	146,37	133,81	156,53
Custo de captura (US\$/tCO₂)		-	50,53	46,67	48,19

Nota: 1 – Assumindo preço de custo para as zeólitas, conforme informado na Tabela 5.16.

Fonte: Elaboração própria

Verifica-se um esperado aumento do custo da geração elétrica em função da inclusão das unidades de captura de CO₂, variando de 57% a 84%. Nota-se que há um menor impacto no custo de geração nos casos em que o sistema de captura TSA é empregado, sobretudo quando há aproveitamento de calor residual. Não obstante estas apresentarem maior custo de capital, refletindo também em um maior custo de O&M fixo, os resultados de custo de O&M variável foram significativamente menores para as plantas de TSA, muito em função do uso de zeólitas sintetizadas das cinzas ao preço do custo de produção.

Quanto ao custo nivelado da captura do CO₂, os três casos simulados apresentam pouca diferença de valores, sendo o menor custo verificado para o caso CCS TSA otm, seguido pelo benchmark de absorção química. Ou seja, mesmo apresentando menor impacto sobre o custo de geração elétrica, o custo de captura obtido para o caso CCS TSA foi superior ao caso CCS ABS. Isso é consequência da maior quantidade de CO₂

que é gerada e, conseqüentemente, capturada, no caso CCS ABS, dado o processo acarreta uma demanda maior por energia térmica de regeneração da substância de carregamento do CO₂. Conseqüentemente, o denominador da equação de cálculo do custo nivelado é maior, reduzindo o valor da relação de cálculo do custo nivelado. Em outras palavras, a maior penalidade energética do processo, nesse caso, acaba por impactar positivamente no indicador de custo de captura de CO₂. Isso denota cautela na avaliação do indicador de custo de captura (US\$/tCO₂) como critério demonstrativo de desempenho econômico das tecnologias.

A Tabela 5.23 e a Tabela 5.24 apresentam os componentes de custo depreendidos das simulações de casos para as usinas termelétricas a bagaço de cana-de-açúcar e a resíduos de eucalipto, respectivamente. Um maior detalhamento dos custos para estas usinas é apresentado no Apêndice A.

Tabela 5.23. Componentes de custo dos casos simulados para a usina termelétrica a bagaço de cana-de-açúcar

Componentes de custo		Sem CCS	CCS TSA	CCS TSA otm	CCS ABS
Capital (MUS\$ ₂₀₂₀)	CPE	43,29	453,63	387,50	360,84
	EPC	15,58	90,73	77,50	72,17
	Contingência de Processo	55,06	32,66	27,90	25,98
	Contingência de Projeto	330,36	86,55	98,58	91,80
	CTP	1,00	663,57	591,48	550,79
	Total anualizado (MUS\$/ano)	29,34	58,94	52,54	48,93
O&M fixo (MUS\$/ano)	Trabalho	2,08	2,16	2,16	2,26
	Manutenção	6,21	14,07	11,92	11,52
	Depreciação	7,21	15,12	12,92	12,03
	Total	15,51	31,35	27,00	25,81
O&M variável (MUS\$/ano)	Combustível	-	-	-	-
	Utilidades	0,03	0,04	0,03	0,57
	Outros	0,23	0,52	0,35	1,76
	Make-up de adsorvente/solvente ¹	0,00	15,26	10,29	3,29
	Total	0,26	15,82	10,67	5,62
LCOE (US\$/MWh)		120,10	386,69	295,07	320,41
Custo de captura (US\$/tCO₂)		-	100,71	110,43	60,67

Notas: 1 – Assumindo preço de mercado para as zeólitas, conforme informado na Tabela 5.16.

Fonte: Elaboração própria

Tabela 5.24. Componentes de custo dos casos simulados para a usina termelétrica a resíduos de eucalipto

Componentes de custo		Sem CCS	CCS TSA	CCS TSA otm	CCS ABS
Capital (MUS\$ ₂₀₂₀)	CPE	36,96	358,25	330,28	306,27
	EPC	13,31	71,65	66,06	61,25
	Contingência de Processo	47,02	25,79	23,78	22,05
	Contingência de Projeto	282,11	68,35	84,02	77,92
	CTP	1,00	524,05	504,13	467,49
Total anualizado (MUS\$/ano)		25,06	46,55	44,78	41,53
O&M fixo (MUS\$/ano)	Trabalho	2,11	2,23	2,23	2,23
	Manutenção	5,31	11,22	10,31	9,70
	Depreciação	6,16	11,94	11,01	10,21
	Total	13,58	25,39	23,55	22,14
O&M variável (MUS\$/ano)	Combustível	24,01	30,27	24,01	33,36
	Utilidades	0,47	0,76	0,79	0,77
	Outros	0,05	0,15	0,11	1,86
	Make-up de adsorvente/solvente ¹	0,00	17,20	13,65	4,18
	Total	24,53	48,38	38,57	40,16
LCOE (US\$/MWh)		107,54	252,84	214,78	241,75
Custo de captura (US\$/tCO₂)		-	83,74	80,76	54,01

Notas: 1 – Assumindo preço de mercado para as zeólitas, conforme informado na Tabela 5.16.

Fonte: Elaboração própria

Similarmente à usina fóssil, a introdução da captura de CO₂ onera o custo da geração termelétrica, porém de forma mais intensa, chegando a 222% para a usina a bagaço e 135% para a usina a resíduos de eucalipto. Na comparação entre as tecnologias, nota-se que, nas duas usinas, o custo da geração elétrica é mais impactado no caso CCS TSA e menos impactado no caso CCS TSA otm, com o caso CCS ABS apresentando o impacto intermediário de custo. Não obstante, o custo de captura para as duas usinas é significativamente menor pela adoção da tecnologia benchmark (caso CCS ABS) em relação à tecnologia TSA. No caso das termelétricas a biomassa, isso pode ser reflexo da escolha por considerar o preço de mercado para as zeólitas X ao invés do custo de produção a partir das cinzas, conforme feito para a usina de carvão mineral. Isso fica evidente na observação dos custos de O&M variável, que são consideravelmente maiores para os casos com tecnologia TSA em comparação aos casos CCS ABS, sendo fortemente puxados

pelo custo com reposição de adsorvente. Outrossim, o custo de captura superior também pode refletir efeito regressivo de escala sobre as unidades capital-intensivas de captura de CO₂, que é mais pronunciado para a tecnologia de TSA, devido aos maiores requisitos de investimento, principalmente por ser uma rota menos madura tecnologicamente. Com isso, perspectivas de utilização de adsorventes de baixo custo e de ganhos de experiência tecnológica com a tecnologia TSA para captura de CO₂ configuram oportunidades para redução do custo de captura para a tecnologia. Em todo caso, vale ressaltar que a verificação de um maior custo de captura não representa necessariamente um maior impacto sobre o custo da geração da usina termelétrica, visto que ambas as usinas simuladas apresentaram menor custo de geração para o caso CCS TSA otm.

Na comparação entre todas as termelétricas simuladas com captura de CO₂, observa-se que a captura na termelétrica a carvão mineral apresenta o menor custo nivelado. Tal magnitude superior dos impactos pode estar associada à menor escala de produção assumida para as termelétricas à biomassa (100 MW) em relação à usina fóssil (330 MW), fazendo com que o efeito de escala torne os elevados custos de capital associados às unidades de captura de CO₂ mais significativos na formação dos custos da eletricidade gerada pela planta. Tipicamente, as usinas termelétricas a combustíveis fósseis possuem maior escala que as usinas de bioenergia, principalmente pela maior facilidade logística para abastecimento de combustíveis fósseis, que ocorrem de forma concentrada, face a recursos de biomassa, que ocorrem de forma esparsa em grandes áreas. Smil (2010b) trata deste aspecto pela definição de um parâmetro denominado densidade de potência, medido em W/m², que representa quanta energia por unidade de tempo pode ser tipicamente recuperada em uma determinada quantidade de área para cada tipologia de fonte primária de energia. Entre os diferentes tipos de fontes energéticas avaliados, as fontes fósseis apresentam maiores valores característicos de densidade de potência, enquanto a biomassa apresenta os menores (SMIL, 2010b). Portanto, o elemento de escala traz uma clara vantagem para a implantação da captura de CO₂ em usinas termelétricas fósseis frente a usinas de bioenergia, se tomado o custo por unidade de CO₂ como termo comparativo.

Contudo, evidências de estudos de modelagem de longo prazo concordam com o imperativo da implantação, em maior ou menor grau, de sistemas que proporcionem emissões líquidas negativas, de forma a compensar emissões em setores de difícil abatimento, para que se limite o aumento da temperatura global bem abaixo de 2°C, com grande foco em BECCS, conforme discutido na seção 2.4.1. Portanto, sistemas capazes de proporcionar emissões negativas proveem o serviço essencial para a viabilização de uma economia com emissões líquidas de GEE neutras. Assim, a captura de CO₂ em termelétricas fósseis e a biomassa deve ser compreendida de formas distintas, com relação aos serviços prestados e, sobretudo, ao significado dos custos de captura e sua remuneração²⁹.

Destarte, no sistema em questão, a singularidade da planta termelétrica fóssil com a fábrica de zeólitas está no fornecimento de adsorvente para alimentar o sistema, enquanto a singularidade das plantas a biomassa está na geração de eletricidade e no serviço de emissões negativas. Com isso, a viabilidade das atividades de queima de carvão e fabricação de zeólitas estão fundamentalmente associadas ao preço pago pelas zeólitas. Já as operações das termelétricas a biomassa viabilizam-se de acordo com o valor pago pela eletricidade gerada e pelo serviço de RCA prestado. Nesse sentido, as subseções seguintes avaliam a viabilidade econômica em cada um dos lados do sistema proposto, conforme diferentes níveis de preço pago pelos serviços-chave prestados.

5.2.3.1 Viabilidade das operações da termelétrica a carvão diante de diferentes preços das zeólitas

A viabilidade econômica do lado fóssil do sistema proposto, ou seja, que inclui a operação da planta termelétrica a carvão e a fabricação de zeólitas a partir das cinzas geradas, é feita a partir da estimativa do nível mínimo de produção necessário para garantir a receita necessária para cobrir os custos das operações. A Tabela 5.25 apresenta uma avaliação nesse sentido, considerando diferentes cenários de preço para as zeólitas. Nesse sentido, são considerados três cenários de preços para as zeólitas:

²⁹ Uma discussão mais detalhada a esse respeito é apresentada na seção 4.2.2.

- (i) Cenário Mercado FOB: Estimativa do preço *free on-board* das zeólitas X no mercado global. Utilizado no caso base das simulações técnico-econômicas de custos;
- (ii) Cenário Mercado CIF: Estimativa do preço das zeólitas X mercado global incluindo custos com seguro, frete e taxas aduaneiras;
- (iii) Cenário Mercado 50% FOB: Metade do preço FOB das zeólitas X.

Tabela 5.25. Avaliação das necessidades de produção de zeólitas X para cobrir os custos da termelétrica a carvão

<i>Produção necessária para autoconsumo e venda visando cobrir o custo da captura de CO₂ na termelétrica a carvão mineral</i>					
Cenário de preço das zeólitas X	Preço de venda (US\$/kg)	CCS TSA		CCS TSA otm	
		Produção (t/ano)	Plantas industriais de zeólitas	Produção (t/ano)	Plantas industriais de zeólitas
<i>Mercado FOB</i>	2,80	47.674	2	38.382	2
<i>Mercado CIF</i>	5,04	27.358	2	22.256	1
<i>Mercado 50% FOB</i>	1,40	125.565	6	100.206	5

<i>Produção necessária para autoconsumo e venda visando cobrir todo o custo da termelétrica a carvão mineral</i>					
Cenário de preço das zeólitas X	Preço de venda (US\$/kg)	CCS TSA		CCS TSA otm	
		Produção (t/ano)	Plantas industriais de zeólitas	Produção (t/ano)	Plantas industriais de zeólitas
<i>Mercado FOB</i>	2,80	127.707	6	118.414	5
<i>Mercado CIF</i>	5,04	66.169	3	61.066	3
<i>Mercado 50% FOB</i>	1,40	363.642	15	338.284	14

Fonte: Elaboração própria

Na parte superior da tabela, encontram-se os valores mínimos de produção de zeólitas necessários para que as fábricas possam atingir a receita suficiente para cobrir os custos adicionais da planta fóssil decorrentes da implantação do sistema de captura de CO₂, bem como para suprir a demanda de captura de CO₂ na termelétrica a carvão, em diferentes cenários de preços das zeólitas. Na parte inferior, são apresentados os níveis mínimos de produção que geram uma receita de vendas capaz de cobrir não apenas os custos de fabricação das zeólitas, mas também os custos operacionais da usina termelétrica. Em outras palavras, essa situação representa a geração de eletricidade a um custo zero. A Figura 5-5 mostra tais informações na forma de um gráfico.

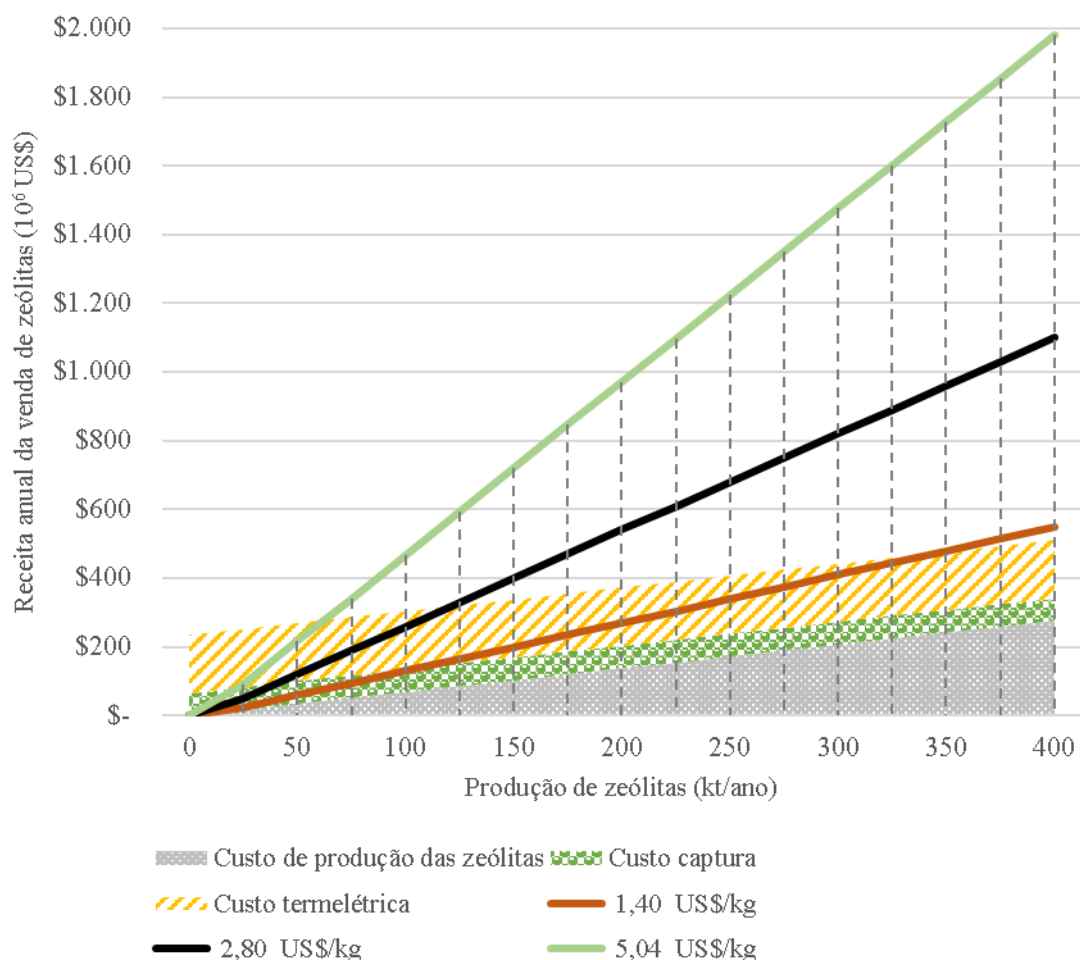


Figura 5-5. Custos e receita da produção de zeólitas a partir de cinzas em função do nível de produção

Fonte: Elaboração própria

O cenário “Mercado FOB” apresenta uma margem de lucro próxima a 75% para a produção das zeólitas X. Nesse contexto, a produção de 38 a 48 mil toneladas anuais de zeólitas X seria suficiente para atender à demanda interna das unidades de captura de CO₂ TSA e gerar um excedente de produção vendável, o qual cobriria integralmente os custos associados à captura de CO₂. Isso implica na necessidade de produção em pelo menos duas unidades industriais operando na escala de 25 mil toneladas por ano. Por outro lado, para cobrir todos os custos da usina termelétrica, seria necessária uma produção mínima de 118 a 128 mil toneladas anuais de zeólitas X. Essa demanda exigiria a produção completa de aproximadamente cinco plantas industriais de zeólitas. Vale ressaltar que esse cenário de preços representa uma grande vantagem para as indústrias que utilizam zeólitas no Brasil, uma vez que lhes

permitiria adquirir o produto nacional a preços FOB semelhantes aos produtos importados, eliminando as despesas associadas à importação.

Já no cenário “Mercado CIF”, o preço mais elevado proporciona uma margem de lucro superior para a produção de zeólitas X, que alcança 86%. No entanto, torna a aquisição das zeólitas X por consumidores nacionais indiferente em relação à importação, pelo menos em termo do preço. Nesse cenário, a produção mínima necessária de zeólitas X para autoconsumo e cobertura do dispêndio com a captura de CO₂ é de 22 a 27 mil toneladas anuais, o que se aproxima da produção obtida em uma única planta industrial de produção de zeólitas. Os custos totais da termelétrica poderiam ser cobertos com a produção de 61 a 66 mil toneladas anuais de zeólitas X, ou seja, menos do que a produção total de apenas 3 plantas industriais.

O cenário “50% Mercado FOB”, por sua vez, reduz a margem de lucro da produção de zeólitas para aproximadamente 50%, sendo o que apresenta maior competitividade para o produto no mercado brasileiro. Não apenas o consumidor não necessitaria arcar com as despesas de importação, como também poderia adquirir o produto a um preço equivalente à metade do valor do mercado global. Nesse caso, com a redução da margem de lucro, observa-se um aumento substancial da necessidade de produção para suprir os custos da termelétrica. A captura de CO₂ necessitaria de uma produção anual entre 100 e 126 mil toneladas anuais para ter seus custos cobertos, necessitando ao menos de 5 plantas industriais para gerar tais quantidades. Já a cobertura dos custos da termelétrica como um todo necessitaria de uma produção da ordem de 338 a 367 mil toneladas por ano de zeólitas X, requerendo assim 14 ou 15 plantas industriais.

Visto que o potencial total de cinzas geradas na planta termelétrica é capaz de proporcionar uma produção de ao menos 425 mil toneladas por ano de zeólitas X (Tabela 5.18), haveria em todos os cenários de preço considerados a disponibilidade de matéria-prima para assegurar uma produção mínima de zeólitas capaz de arcar com os custos não apenas da captura de CO₂, mas de toda a usina termelétrica a carvão mineral. Dessa forma, existindo um mercado consumidor capaz de abarcar tais quantidades de produto, a usina a carvão poderia transitar de um negócio do setor de energia para um negócio do setor industrial químico de venda de zeólitas,

sendo a exportação de energia elétrica excedente um coproduto do processo. Nessa perspectiva, vale destacar que a otimização do processo TSA por meio da recuperação de calor residual reduz em cerca de 20% e 7% a necessidade de produção de zeólitas para abatimento dos custos da captura de CO₂ e da termelétrica como um todo, respectivamente. Isso ocorre em razão de a referida otimização reduzir o autoconsumo de zeólitas e requerer uma planta menos custosa. Portanto, trata-se de um passo importante não somente para o processo de captura de CO₂, mas também para toda a lucratividade potencial da cadeia de valor das zeólitas a jusante.

No que concerne a absorção pelo mercado de bioenergia, quanto maior o preço das zeólitas, menor é o número necessário de plantas atendidas para viabilizar a captura de CO₂ na termelétrica a carvão. Porém, maior fica o custo da operação de BECCS para as plantas atendidas. A Tabela 5.26 mostra, para cada cenário de preço, o número mínimo de plantas de BECCS atendidas para que as vendas de zeólitas viabilizem o custo total da termelétrica fóssil com captura de CO₂, assim como custo do BECCS nos diferentes cenários de preço.

Tabela 5.26. Impacto do preço das zeólitas na necessidade de atendimento de termelétricas a biomassa e no custo do BECCS

Cenário de preço das zeólitas X	Preço de venda (US\$/kg)	Usinas a bagaço		Usinas a eucalipto	
		Necessidade de atendimento (# de plantas)	Custo da captura (US\$/tCO ₂)	Necessidade de atendimento (# de plantas)	Custo da captura (US\$/tCO ₂)
<i>Mercado FOB</i>	2,80	55	72	42	87
<i>Mercado CIF</i>	5,04	27	79	20	99
<i>Mercado 50% FOB</i>	1,40	163	68	123	80

Fonte: Elaboração própria

No cenário Mercado CIF, o custo total da termelétrica seria pago com o fornecimento de zeólitas para 20 usinas a resíduos de eucalipto (2 GW) ou 27 a bagaço (2,7 GW). Porém, essas termelétricas a eucalipto e bagaço deveriam estar dispostas a pagar ao menos 79 e 99 US\$/tCO₂ para a compra das zeólitas a esse preço ser viável. Já no cenário considerado com o preço mais baixo para as zeólitas, a termelétrica fóssil requereria a venda de zeólitas para BECCS em 123 usinas a resíduos de eucalipto (12,3 GW) ou 163 usinas a bagaço (16,3 GW). Contudo, nesse

cenário as usinas teriam custos de BECCS de 68 e 80 US\$/tCO₂, respectivamente. Ou seja, há uma solução de compromisso entre o potencial de lucratividade do negócio de venda de zeólitas de cinzas de carvão mineral e o custo do BECCS com a tecnologia TSA utilizando o adsorvente.

5.2.3.2 Viabilidade das operações das termelétricas com BECCS diante de diferentes preços do serviço de RCA e da eletricidade gerada

Pelo lado das plantas de geração elétrica a biomassa, a viabilidade econômica dá-se de acordo com diferentes níveis de preços para a venda dos serviços que elas prestam, ou seja, da eletricidade gerada e do serviço de RCA³⁰. Para tanto, a avaliação é feita a partir do preço mínimo necessário para venda de um dos serviços com diferentes níveis de preço do outro. Tais avaliações são apresentadas na Figura 5-6 e na Figura 5-7, nas quais se verifica o preço mínimo da eletricidade e do serviço de RCA, respectivamente, em função da variação do parâmetro complementar.

Os níveis de preços da eletricidade considerados variam desde 0 a 300 US\$/MWh, com três patamares intermediários, sendo um deles o de 47 US\$/MWh, que é o preço interno da energia considerado na modelagem técnico-econômica do sistema (Tabela 5.16). O patamar mais elevado representa um arredondamento do maior valor para o Preço de Liquidação das Diferenças máximo horário (PLD_{max_horário}) na série histórica dos últimos 4 anos (CCEE, 2023a). Já os níveis de preço para o serviço de RCA vão de 0 a 180 US\$/tCO₂, valor atualmente considerado para o recebimento de créditos fiscais pelo governo dos EUA para projetos de DAC (IEA, 2023b).

³⁰ Vale ressaltar que, ao prover o serviço de RCA, a inclusão da captura de CO₂ em termelétricas a biomassa tem o potencial de se remunerar como um produto. Assim, trata-se de uma perspectiva diferente da captura em termelétricas fósseis, que representam essencialmente um custo para as usinas.

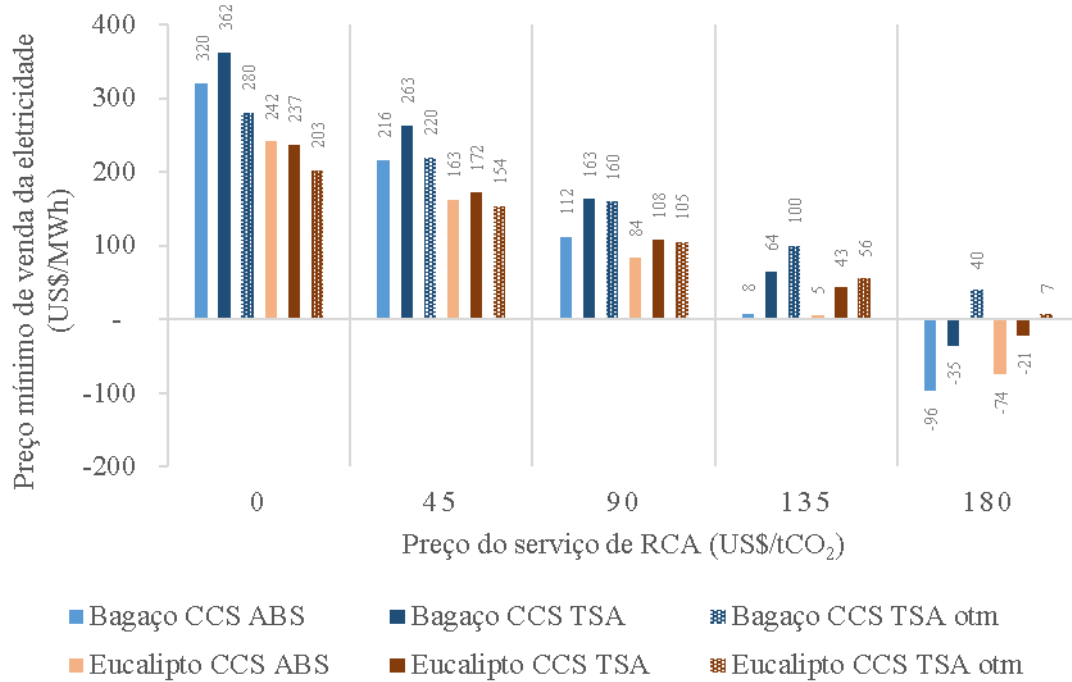


Figura 5-6. Variação do preço mínimo de venda da eletricidade pelas termelétricas a biomassa em função do preço pago pelo serviço de RCA

Fonte: Elaboração própria

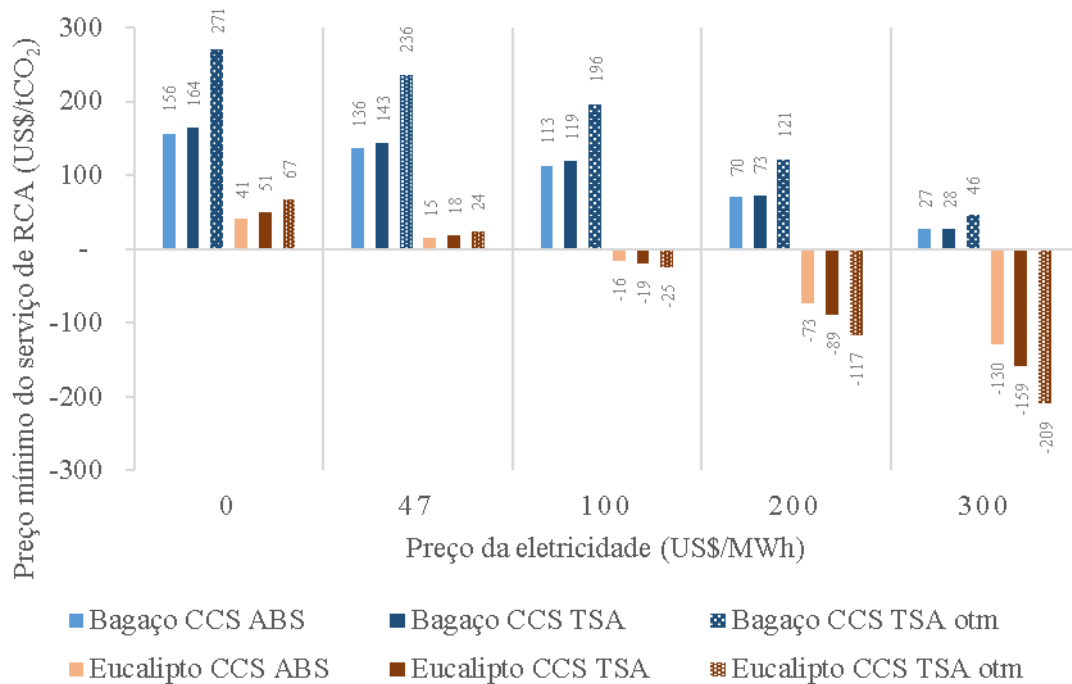


Figura 5-7. Variação do preço mínimo de venda do serviço de RCA em função do preço pago pela eletricidade

Fonte: Elaboração própria

No que tange o preço mínimo de venda da eletricidade, é possível perceber que, na maioria dos casos, as termelétricas a bagaço necessitam vender a eletricidade a um preço maior que as usinas a eucalipto, considerando o uso das mesmas tecnologias de captura. Comparando as tecnologias de captura entre si, também é possível perceber que, quando o serviço de RCA não é precificado, o uso da tecnologia ABS requer um preço de venda mínimo de eletricidade maior que a tecnologia TSA otm. Contudo, conforme o serviço vai sendo precificado a maiores valores, o preço de venda da eletricidade cai mais fortemente para o processo ABS do que para o TSA. Isso pode ser explicado pela menor eficiência do processo, que para manter o nível de geração elétrica requer a queima de mais combustível, produzindo e captura mais CO₂ biogênico, o que faz com que sua receita seja mais sensível ao preço da tonelada de CO₂ removida. Quanto aos níveis de preço do serviço de RCA, nota-se que apenas no maior nível considerado é que algumas tecnologias conseguem ser lucrativas sem a venda da eletricidade. Nesse caso, a única tecnologia que não se viabiliza para ambas as plantas é, curiosamente, a TSA otm. A razão para isso é o oposto do caso da tecnologia ABS: como a TSA otm é mais eficiente, queima menos combustível e captura menos CO₂, relativamente, sendo sua lucratividade menos sensível ao preço do serviço de RCA.

Por sua vez, a análise dos preços mínimos de venda de RCA em função da variação do preço da eletricidade mostra um quadro diferente da análise anterior. Nesse caso, a eficiência das plantas influencia diretamente a lucratividade das plantas. Dessa forma, as plantas a eucalipto viabilizam-se a preços muito menores que as plantas a bagaço, por serem mais eficientes. Nesse sentido, as plantas a eucalipto viabilizam-se mesmo sem a venda de RCA em um preço de eletricidade entre 47 e 100 US\$/MWh, enquanto as plantas a bagaço requerem em todos os casos a venda do serviço de RCA a pelo menos 27 US\$/tCO₂, no caso com maior preço de eletricidade dentro da faixa considerada.

5.2.4 Análise de barreiras e cobenefícios

Nesta seção, são discutidas barreiras e cobenefícios da implementação do sistema proposto, tendo como objetivo subsidiar discussões sobre políticas públicas de fomento ao seu desenvolvimento.

5.2.4.1 Análise de barreiras

No que tange às barreiras, é possível destacar importantes barreiras tecnológicas para implementação do sistema proposto. Primeiramente, no que se refere à tecnologia de captura de CO₂ por adsorção em ciclos TSA, é importante destacar que se trata de uma tecnologia ainda incipiente, usualmente classificada como tendo um nível de prontidão tecnológica TRL 7³¹ (HONG, W. Y., 2022; KEARNS; LIU; CONSOLI, 2021; US GAO - UNITED STATES GOVERNMENT ACCOUNTABILITY OFFICE, 2022; WOOD, 2018). Isso significa que a tecnologia ainda não se encontra em pleno grau de desenvolvimento em nível comercial. Por exemplo, ainda não há um *design* dominante³² para essa tipologia de planta de captura de CO₂, tampouco para determinação do melhor tipo de adsorvente a ser empregado (BUI *et al.*, 2018; HONG, W. Y., 2022). Conforme verificado na análise técnico-econômica do processo, há consideráveis ganhos potenciais de custo e eficiência do processo para *designs* do sistema TSA para captura de CO₂ que permitam o reaproveitamento de calor residual como fonte de energia para regeneração do adsorvente, tal como proposto por Knaebel (2013), o que pode ser um indicativo de forte concorrente a design dominante. Se, por um lado, ainda há boa margem para uma competição entre designs capaz de proporcionar novos ganhos em eficiência e redução nos custos de capital por curva de

³¹ TRL é o acrônimo para nível de prontidão tecnológica (do inglês, *Technology Readiness Level*). Trata-se de uma escala numérica usada para avaliar o estágio de desenvolvimento de uma tecnologia, desenvolvida originalmente pela agência aeroespacial norte-americana (NASA, 2012). Essa escala varia de 1 a 9, onde TRL 1 representa a pesquisa básica e TRL 9 indica uma tecnologia totalmente desenvolvida e pronta para implantação comercial. O TRL fornece uma referência comum para comunicar o progresso e o nível de maturidade de uma tecnologia, sendo frequentemente utilizado em projetos de pesquisa e desenvolvimento para acompanhar e comunicar o avanço tecnológico ao longo do tempo.

³² Na teoria clássica de inovação tecnológica, a formação de um design dominante é o ponto de partida para a difusão de uma tecnologia. Um design dominante surge após um período de experimentação tecnológica, no qual várias ideias são testadas. À medida que as tecnologias amadurecem e as preferências dos consumidores são definidas, um design predominante emerge, caracterizado pela presença dos componentes essenciais em grande parte dos produtos. A partir daí, mudanças futuras ocorrem principalmente por meio de inovações de processo e incrementais, melhorando o design dominante. Contudo, desafiar o design dominante é difícil devido ao sucesso alcançado na fase de experimentação.

aprendizado (ROCHEDO; SZKLO, 2013), há também grande incerteza sobre a viabilidade comercial desse tipo de tecnologia, principalmente por já existir uma tecnologia predominante para captura de CO₂, o *benchmark* ora considerado de absorção química com aminas.

Para além do processo de captura de CO₂, a produção de zeólitas em escala comercial também é fonte de incerteza. Não obstante a existência de muitos estudos de síntese de zeólitas a partir de cinzas de carvão mineral em escala de bancada (AQUINO *et al.*, 2020; BONETTI *et al.*, 2021; ESTEVAM *et al.*, 2022; HONG, J. L. X. *et al.*, 2017; LIU, L. *et al.*, 2011; MAJCHRZAK-KUCĘBA; NOWAK, 2005; MERCEDES MAROTO-VALER *et al.*, 2008; ZGUREVA; BOYCHEVA, 2015; ZHANG, Z. *et al.*, 2017) e de simulação e avaliação técnico-econômica de sua aplicação em larga escala (BIAŁECKA *et al.*, 2022; BONETTI *et al.*, 2022; BOYCHEVA; MARINOV; ZGUREVA-FILIPOVA, 2021; HONG, J. L. X. *et al.*, 2017; MORALES-OSPINO *et al.*, 2020), não se encontraram informações sobre plantas industriais do tipo operando comercialmente. Nesse sentido, a viabilidade técnica do sistema proposto requer um maior nível de experiência na síntese de zeólitas a partir de cinzas de carvão mineral, em escala industrial. Tal experiência é determinante para que se possa compreender de forma precisa parâmetros fundamentais, tais como os custos do processo em condições reais de operação e o nível de qualidade atingido para as zeólitas, particularmente no que se refere a estabilidade química e durabilidade.

Sobre barreiras econômicas e de mercado, um dos principais pontos que se verifica a partir dos resultados da análise técnico-econômica é o elevado custo de investimento das plantas de captura de CO₂ via TSA, comparativamente superior ao investimento do processo benchmark de captura de CO₂. O custo operacional do TSA tende a ser menor que o benchmark, sobretudo em função de o processo tipicamente apresentar menor demanda energética parasítica para regeneração do adsorvente, conforme verificado nos resultados das simulações, corroborados pela literatura científica (HONG, W. Y., 2022). Contudo, o menor grau de maturidade da tecnologia TSA em relação ao benchmark traz incertezas a respeito de o processo efetivamente apresentar menor custo operacional. Não obstante os estudos de engenharia apresentarem com relativa boa precisão no que se refere aos balanços energéticos do processo, há que se ressaltar a incerteza sobre

outros elementos que impactam o custo operacional. Um exemplo é o adsorvente, que pode sofrer desgaste químico ou mecânico diferente do simulado, requerendo uma maior ou menor taxa de reposição, o que impacta diretamente o custo operacional do processo. Tais incertezas também levam a dificuldades na aprovação de financiamento para plantas do tipo por linhas de crédito convencionais.

As barreiras de mercado para o sistema proposto são ainda mais críticas. No caso da produção de zeólitas a partir das cinzas de carvão mineral, não se tem notícia de um mercado nacional em vigor com capacidade de absorver *overnight* uma produção de zeólitas em escala industrial. A única produção nacional de zeólitas sintéticas atualmente dá-se na FCCSA, que foi idealizada e dimensionada para atender a uma demanda cativa por catalisadores das refinarias da Petrobrás (ANTUNES *et al.*, 2000). Seguindo essa linha, uma primeira unidade industrial de produção de zeólitas a partir de cinzas de carvão mineral poderia ser dimensionada para atender à demanda específica da termelétrica geradora das cinzas, mas a evolução da produção dependeria do desenvolvimento de novos mercados, incluindo a captura de CO₂ via TSA.

Entretanto, o próprio desenvolvimento da captura de CO₂ também enfrenta uma forte barreira associada à inexistência de um mercado que valore a técnica enquanto um serviço de mitigação. Para o caso da captura de CO₂ em usinas fósseis, não há em vigor quaisquer mecanismos de mercado no Brasil que permitam ganhos incrementais às usinas decorrentes da adoção dessa prática para mitigação de emissões de GEE. Sendo assim, a captura de CO₂ apenas eleva o custo da geração de energia fóssil, tornando-a menos competitiva em relação à geração com fontes renováveis. Nessa conjuntura, a captura de CO₂ em indústrias fósseis brasileiras tem feito sentido tão somente para a atividade de exploração e produção de petróleo, considerando a possibilidade de aumento da produção por injeção do gás para recuperação avançada (DE C. MERSCHMANN; SZKLO; SCHAEFFER, 2016; DINO; GALLO, 2009). É o caso da Petrobrás, que realiza a separação do CO₂ associado à produção de gás natural em campos da camada pré-sal desde 2008, injetando-o nos poços de petróleo para aumento das taxas de recuperação (GCCSI, 2023).

Para o caso de BECCS, o instrumento em vigor que permitiria valorar serviço é o Renovabio³³, desde que a usina de bioenergia produza biocombustíveis. De fato, o primeiro projeto de BECCS no Brasil, ainda em estágio inicial de desenvolvimento, pertence à empresa produtora de etanol de milho FS (GCCSI, 2023). Trata-se de um investimento de aproximadamente R\$ 350 milhões para captura de CO₂ na usina de produção de etanol e injeção em aquífero salino local, para o qual a empresa espera injetar 423 kt/ano de CO₂, a princípio remunerando o serviço pela emissão de CBIOS (FS, 2023; PETROLI, 2023). Assim sendo, na atual conjuntura, os benefícios do BECCS poderiam ser revertidos na forma de CBIOS para usinas a bagaço de cana-de-açúcar com produção de etanol associada. Contudo, usinas a resíduos de eucalipto, tipicamente dedicadas à geração elétrica exclusivamente, ainda não teriam um mercado capaz de valorar o serviço prestado pela implementação de BECCS.

No âmbito regulatório e institucional, o maior limitante é a ausência de um arcabouço regulatório vigente sobre a cadeia produtiva de CCS. A cadeia de CCS, particularmente no que diz respeito às atividades de transporte do CO₂, possui forte característica de indústria de rede. Assim, a ausência de uma estrutura regulatória indetermina os papéis e responsabilidades dos diferentes atores envolvidos na cadeia produtiva, desde as partes interessadas até as autoridades reguladoras, tornando inviável a formulação de modelos de negócio (COSTA, I., 2014; COSTA, I. *et al.*, 2019; MCTIC, 2017; ROCHEDO *et al.*, 2016). Há também desafios jurídico-legais no segmento de injeção de CO₂, referentes a procedimentos e condições para outorga de exploração de reservatórios geológicos para fins de armazenamento de CO₂, a definições sobre autoridades de regulação e fiscalização das atividades, a critérios para encerramento do ciclo de injeção, e à determinação de diretrizes para licenciamento ambiental dos projetos (CCS BRASIL, 2023).

Sobre as barreiras culturais e de capacitação, projetos de CCS usualmente sofrem resistência pública da população próxima a sua região de influência, em uma

³³ O Programa Renovabio é uma política brasileira lançada em 2016 que visa incentivar a produção e o uso de biocombustíveis em substituição aos combustíveis fósseis. O programa estabelece metas anuais de descarbonização para distribuidoras de combustíveis, as quais devem adquirir Créditos de Descarbonização (CBIOS) emitidos pelos produtores de biocombustíveis. Esses créditos representam a redução de emissões de gases de efeito estufa proveniente da substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis (BRASIL, 2019).

manifestação do efeito conhecido como NIMBY (do inglês, *Not In My Backyard*, em tradução livre “Não no meu quintal”). Wallquist *et al.* (2012) mediram o nível de aceitação pública para projetos de CCS, apresentando-os de forma conjunta e em etapas isoladas. Percebeu-se uma maior resistência à avaliação isolada das partes do sistema em relação à percepção do impacto da cadeia de CCS como um todo, com forte manifestação do efeito NIMBY para tubulações e sítios de injeção. Braun (2017) também verificou o efeito NIMBY em relação a sítios de injeção de CO₂, observando maior resistência a projetos de CCS em pessoas com residências mais próximas a locais mapeados como potenciais sítios de injeção.

Além da possível oposição pública a projetos de CCS, há também uma potencial barreira relativa à resistência por parte dos geradores de eletricidade em adotar a tecnologia de captura de CO₂, sobretudo via a tecnologicamente incipiente rota TSA. No caso da termelétrica a carvão mineral, a descarbonização da economia impõe a necessidade de adaptação das plantas a um novo padrão de emissões de GEE, sendo indispensável a adoção da captura de CO₂ para a sobrevivência do setor nessa nova conjuntura. Nesse sentido, a possibilidade da integração da rota TSA ao aproveitamento das cinzas enquanto matéria-prima do adsorvente configura uma grande vantagem comparativa à implementação em relação às demais tecnologias. Para o caso das termelétricas a bioenergia, por outro lado, a adoção da captura de CO₂ não se trata de um elemento vital para a sobrevivência das plantas, uma vez que já empregam um combustível renovável. Porém, o uso de BECCS pode ser oportuno para que a planta forneça o serviço de remoção de CO₂, possibilitando receitas adicionais pela emissão de créditos em mercados de carbono. Nesse caso, porém, a tecnologia TSA disputaria mercado com outras tecnologias de captura de CO₂, com a desvantagem de ser menos desenvolvida tecnologicamente.

A Tabela 5.27 sumariza as principais barreiras identificadas para implementação do sistema proposto.

Tabela 5.27. Principais barreiras identificadas para o sistema de captura de CO₂ com zeólitas de cinzas de carvão mineral para a obtenção de emissões negativas

Classe	Barreiras
Técnica	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo nível de prontidão tecnológica da captura de CO₂ via TSA (TRL 7) • Inexistência de plantas de produção de zeólitas de cinzas de carvão mineral em escala industrial • Desconhecimento do nível de qualidade das zeólitas produzidas em escala industrial
Econômica e de mercado	<ul style="list-style-type: none"> • Alto custo de investimento em relação à tecnologia benchmark • Desconhecimento dos reais custos operacionais: incerteza sobre a taxa de reposição das zeólitas • Dificuldade de obtenção de financiamento por linhas de crédito convencionais • Inexistência de mercado de carbono em vigor no Brasil • Inexistência de mercado capaz de absorver a produção de zeólitas em escala industrial no Brasil
Regulatória e institucional	<ul style="list-style-type: none"> • Ausência de arcabouço regulatório para atividades de CCS no Brasil • Indefinição de autoridades reguladoras para os seguimentos da cadeia do CCS • Falta de coordenação entre os potenciais atores envolvidos no sistema proposto
Cultural e de capacitação	<ul style="list-style-type: none"> • Efeito NIMBY para a cadeia do CCS • Resistência de geradores em adotar a captura de CO₂, particularmente termelétricas a bioenergia • Falta de mão-de-obra capacitada para operação de plantas TSA para captura de CO₂ e de plantas de produção de zeólitas • Identificação do carvão como uma indústria poluente

Fonte: Elaboração própria.

5.2.4.2 Análise de cobenefícios

A análise de cobenefícios toma como base as discussões do SR1.5 (IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2018), particularmente no que diz respeito aos efeitos da implementação de sistema de CCS em usinas a combustíveis fósseis e a bioenergia (BECCS) sobre os demais ODS além do ODS 13. A partir daí, a discussão é adaptada ao desenho do sistema proposto de captura de CO₂ com zeólitas de cinzas de carvão mineral para a obtenção de emissões negativas e ao contexto brasileiro. Para melhor organização do texto, as discussões são apresentadas

em subtópicos relativos a cada ODS em que se verificaram interações de sinergias e/ou *trade-offs*.

- ***ODS 1: Erradicação da pobreza***

Para o ODS 1, são apontadas no SR1.5 sinergias e *trade-offs* associadas à implementação de BECCS, em função da adoção de sistemas de bioenergia em larga escala. O relatório destaca um possível impacto positivo de tais sistemas em geração de empregos e renda para os trabalhadores agrícolas e em diversificação de fluxos de receita para os agricultores. Também menciona o impacto positivo que o acesso a fontes modernas de energia pode ter no cultivo de terras marginais, gerando mais empregos e renda no setor agrícola. Os *trade-offs* apontados são que os sistemas de bioenergia em larga escala possam induzir a perda de empregos, em função da mecanização agrícola, e alterações na estrutura das cadeias agrícolas globais, que venham a ser desfavoráveis a pequenos agricultores. Para a implementação do CCS fóssil, não são apontadas interações diretas com o ODS 1.

No caso do sistema proposto, vale ressaltar que já há uma ampla participação de sistemas de bioenergia em larga escala na economia brasileira. Pelo lado dos empregos, mesmo com o crescente avanço da mecanização agrícola, particularmente na colheita da cana-de-açúcar (CONAB, 2023; GOLDEMBERG; COELHO; GUARDABASSI, 2008), o Brasil apresenta o segundo maior número de empregos verdes no mundo, do qual a maior parte vem do setor de bioenergia (IRENA; ILO, 2022). Sobre a dinâmica das relações entre o agronegócio da bioenergia em larga escala e os pequenos agricultores, entende-se que a adoção de BECCS no país não necessariamente implica crescimento da participação da bioenergia, já que seria possível apenas adicionar unidades de captura de CO₂ a plantas existentes ou novas. Portanto, sendo os *trade-offs* citados no SR1.5 associados exclusivamente ao desenvolvimento da bioenergia em grande escala, é improvável que a implementação de BECCS represente algum impacto per se, no contexto brasileiro.

Por outro lado, no caso do CCS fóssil associado à produção de zeólitas, o principal mote para a implementação de um sistema do tipo diz respeito à transição justa para as regiões com produção e reservas de carvão mineral. Nesse sentido, entende-se que o sistema proposto permite uma transição dos negócios da indústria carbonífera local do

setor de energia para o setor químico, em uma atividade com forte alinhamento à descarbonização da economia. Tal atividade alternativa permitiria a manutenção de emprego e renda local, tanto pela manutenção de um mínimo nível de lavra e queima de carvão mineral, mas também, principalmente, pelo novo negócio ligado à produção e venda de zeólitas. Com isso, as atividades alternativas propostas poderiam evitar o desemprego e a pobreza local causada pelo cessar das atividades da indústria carbonífera.

- ***ODS 2: Fome zero e agricultura sustentável***

As interações da adoção de sistemas de BECCS com o ODS 2 também são expressas em sinergias e *trade-offs* no SR1.5. O relatório traz os mesmos pontos de interação mencionados para o ODS 1, no que tange a adoção de sistemas de bioenergia em larga escala. Mormente, menciona a preocupação de que a expansão da bioenergia para promover os serviços de BECCS necessários possa resultar em preços de alimentos muito altos. Entretanto, o trabalho ressalva que tal efeito não é amplamente apoiado na literatura, uma vez que estudos mostram impactos menores nos preços dos alimentos que o impacto das mudanças climáticas nas colheitas. Além disso, o uso de BECCS magnifica o potencial de mitigação de sistemas de bioenergia, o que pode diminuir a quantidade necessária de uso de biomassa para fins de mitigação de mudança climática, reduzindo assim a pressão dos sistemas de bioenergia sobre a produção e, conseqüentemente, os preços dos alimentos. No entanto, a competição pelo uso da terra e a redução do carbono do solo são questões que precisam ser consideradas. No caso da adoção de sistemas de CCS fóssil, não são destacadas interações com o ODS 2.

Adaptando tais discussões acerca do uso de sistemas de bioenergia em larga escala ao contexto brasileiro, é importante destacar que o país já conta com uma considerável base de produção de bioenergia, muito representativa no setor de biocombustíveis (COELHO *et al.*, 2006; RATHMANN; SZKLO; SCHAEFFER, 2012) e elétrico (ANEEL, 2023). Portanto, a adoção de BECCS passaria mais pela implementação da tecnologia de captura de CO₂ na etapa industrial da cadeia produtiva do que em mudanças no setor agrícola do país, não necessariamente implicando os efeitos negativos associados ao avanço da bioenergia, no caso específico do Brasil.

Por outro lado, estudos apontam o grande potencial do Brasil de promoção do serviço de remoção de carbono da atmosfera via BECCS, necessário para que se atinjam os objetivos do Acordo de Paris (DA SILVA, F. T. F. *et al.*, 2018; FUSS *et al.*, 2018; KÖBERLE, 2019; TAGOMORI *et al.*, 2018; TAGOMORI; ROCHEDO; SZKLO, 2019). Ao considerar BECCS como parte integrante, portanto, o sistema proposto contribui com esforços de mitigação, que são vitais para limitar a magnitude dos impactos da mudança do clima, inclusive sobre os sistemas agrícolas de produção de alimentos no Brasil.

- ***ODS 3: Saúde e bem-estar***

O SR1.5 apresenta sinergias e *trade-offs* para as tecnologias que compõem o sistema proposto na saúde e bem-estar da população. No caso de BECCS, aponta-se a vantagem de substituir a queima de carvão mineral por biomassa sustentável, em função da redução da poluição nos seguimentos *upstream* e *downstream* da cadeia produtiva carbonífera. Pelo lado do *upstream*, destaca-se a redução da poluição do ar e de corpos hídricos, além da prevenção de acidentes provenientes da lavra de carvão mineral. No *downstream*, os impactos associam-se a uma possível redução da emissão de poluentes locais oriunda da queima do carvão mineral. Acrescentando o BECCS ao uso da biomassa na substituição do carvão mineral, o relatório propõe um possível *trade-off* proveniente do risco de vazamento de CO₂ ao longo da cadeia, seja das formações geológicas de armazenamento permanente ou da infraestrutura de movimentação do gás carbônico. No caso do CCS fóssil, somado ao *trade-off* do risco de vazamento de CO₂, o SR1.5 aponta que a adoção desta tecnologia em usinas termelétricas a carvão mineral prolonga a vida útil da cadeia produtiva do carvão mineral, mantendo os impactos deletérios das atividades associadas a sua lavra. Além disso, a penalidade energética auferida com a implementação de sistemas de captura de CO₂ pode levar à necessidade de aumento da exploração de carvão mineral para manter os níveis de geração elétrica, ampliando os efeitos negativos da cadeia produtiva do combustível sobre a saúde e bem-estar da população.

Para o sistema proposto neste trabalho, primeiramente há que se ressaltar as sinergias apontadas para a adoção de BECCS no contexto brasileiro. O carvão mineral configura uma fonte com baixa participação na matriz elétrica do país, tendo

representado apenas 2,1% da eletricidade gerada no país em 2022, enquanto que a biomassa foi responsável por 8,0% no mesmo período (EPE, 2023). Assim, é irrealista considerar que o aumento da bioenergia reflète na substituição de carvão mineral no país. Por outro lado, o sistema proposto não prevê a ampliação da instalação de captura de CO₂ em termelétricas fósseis, mas a manutenção de um nível mínimo de queima de carvão, com captura de CO₂, apenas para geração da matéria-prima necessária à fabricação do adsorvente empregado no processo de captura. Como avaliado, o potencial de produção de zeólitas supera em muito a demanda para autoconsumo de captura de CO₂ na termelétrica, de sorte que a lavra de carvão mineral necessária apenas para atender ao mercado de zeólitas seria muito inferior ao volume de exploração do recurso fóssil considerando a geração elétrica como atividade fim.

Assim, tomando como parâmetro a intensidade atual de atividade da indústria do carvão mineral, o sistema proposto reduz consideravelmente a necessidade de lavra de carvão mineral, podendo reduzir impactos na saúde e bem-estar da população, em sinergia com o ODS 3. Contudo, se tomado como referência o abandono completo do carvão mineral, o sistema proposto representa um *trade-off* com os objetivos do ODS 3, dado o trancamento tecnológico de um nível mínimo de atividade da cadeia de exploração e queima de carvão mineral.

- ***ODS 4: Educação de qualidade***

Não foram identificadas interações com o ODS 4 no SR1.5. O presente trabalho também não apresenta evidências de cobenefícios.

- ***ODS 5: Igualdade de gênero***

Não foram identificadas interações com o ODS 5 no SR1.5. O presente trabalho também não apresenta evidências de cobenefícios.

- ***ODS 6: Água potável e saneamento***

No SR1.5, as interações das tecnologias de CCS com o ODS 6 são mencionadas na forma de *trade-offs* e sinergias. Pelo lado dos *trade-offs*, o relatório traz o ponto de que os equipamentos de captura de CO₂ geralmente requerem acesso à água para resfriamento e processamento. Além disso, a penalidade energética da tecnologia requer

um maior uso dos recursos energéticos para manter o nível de geração, pressionando o uso de recursos hídricos no *upstream* das cadeias produtivas, tanto na agricultura quanto na lavra de carvão mineral. Por outro lado, o texto traz a ressalva de que alguns processos da cadeia de CCUS podem aumentar a eficiência no uso de água em relação a sistemas sem captura de CO₂, a partir de metodologias de integração de processos.

Na avaliação do sistema proposto, as simulações efetuadas mostram que há um ganho representativo em termos de uso de recursos hídricos para os processos de captura de CO₂ com tecnologia TSA em relação à tecnologia benchmark de absorção química com aminas, sobretudo no caso considerando o reaproveitamento de calor residual para recuperação do adsorvente. Para o caso do aumento do uso de recursos, conforme destacado para o ODS 3, a implementação de BECCS a partir do sistema proposto não prevê necessariamente um aumento da produção de biomassa, ao passo que, na parte fóssil da cadeia de produção, é prevista uma queda considerável da lavra de carvão mineral necessária para atender aos requisitos de zeólitas na captura de CO₂. Outrossim, consoante à produção de zeólitas, um dos empregos possíveis para o adsorvente é no tratamento de água (LUZ, 1995). Assim, dado o alto potencial identificado para a produção de zeólitas de cinzas de carvão mineral, o excedente da produção também poderia ser direcionado para essa finalidade, contribuindo sinergicamente com o ODS 6 no quesito de saneamento.

- ***ODS 7: Energia limpa e acessível***

As interações das tecnologias contidas no sistema proposto com o ODS 7 são apresentadas como sinergias no SR1.5. O relatório destaca que, apesar das penalidades energéticas, os sistemas com CCS, tanto fóssil quanto a biomassa, proporcionam o acesso a fontes modernas de energia limpa, módicas e confiáveis. Tais preceitos também se aplicam ao sistema proposto.

- ***ODS 8: Trabalho decente e crescimento econômico***

As tecnologias de CCS a biomassa e fóssil são apresentadas no SR1.5 como possuindo interações em sentidos opostos junto ao ODS 8. Para sistemas de BECCS, o relatório destaca que o impacto na oferta de bioenergia deve ter impacto positivo na geração de empregos. Por outro lado, a implementação de CCS em usinas fósseis pode

ocasionar um efeito trancamento para o capital humano e físico na indústria de recursos fósseis.

No caso do sistema proposto neste estudo, primeiramente vale ressaltar novamente o alto grau de desenvolvimento que já há na indústria de bioenergia no Brasil. Com isso, a instalação de sistemas de captura de CO₂ nas plantas não necessariamente implica a expansão da bioenergia no país. Contudo, pode-se considerar que deverá haver uma demanda adicional de trabalho nas usinas de bioenergia, referente tanto aos serviços operacionais ligados à captura de CO₂ quanto a serviços comerciais e administrativos associados à gestão dos negócios de carbono. Além disso, o desenvolvimento em larga escala de BECCS também deverá gerar emprego e renda para trabalhadores nas diversas operações da nova cadeia produtiva de CCS, à montante e a jusante da planta de bioenergia.

Pelo lado da indústria carbonífera, é fato que se assume a manutenção de operações de lavra e queima de carvão mineral, o que poderia caracterizar um efeito de trancamento tecnológico ocasionado pelo sistema proposto. Contudo, vale ressaltar que se requer um nível de fluxo operacional muito inferior para tais atividades em relação ao atualmente praticado no mercado de energia, tomando como parâmetro de dimensionamento as necessidades de produção de zeólitas. Isso atenuaria a intensidade do efeito de trancamento tecnológico em relação à adoção em massa de grandes sistemas de CCS para manter os níveis de participação da geração termelétrica fóssil na matriz energética.

Outro ponto de maior relevância é a criação de uma cadeia produtiva para a produção de zeólitas a partir das cinzas do carvão mineral com o sistema proposto. Conforme mencionado para o ODS 1, há grande espaço para geração local de emprego e renda com a produção de zeólitas, em um contexto que permite com que a cadeia do CCS possa ser um elemento-chave para promoção de uma transição justa para os trabalhadores da indústria do carvão no contexto da descarbonização da economia.

- ***ODS 9: Indústria, inovação e infraestrutura***

O SR1.5 aponta importantes sinergias das tecnologias de CCS com o ODS 9. É apontado que a descarbonização profunda por meio de grandes mudanças tecnológicas

nos setores industriais emissores, incluindo o de energia, incorrerão em inovações radicais nas indústrias em termo de estratégias de inovação, processos e equipamentos, habilidades, técnicas produtivas e design, entre outros. Além disso, sistemas de CCS de grande porte requererão o desenvolvimento massivo da infraestrutura para transporte do CO₂.

Tais efeitos também são esperados para a implementação do sistema proposto de produção de zeólitas a partir de cinzas de carvão mineral para captura de CO₂. Particularmente, em termos de estratégia industrial, é possível pensar em diferentes arranjos possíveis entre os diferentes atores da cadeia de produção, entre os proprietários da termelétrica fóssil, das fábricas de zeólitas e das termelétricas a biomassa, para além dos demais atores a montante e a jusante em cada cadeia. O grande número possível de combinações de interações e interesses em cada ponto dessas cadeias proporciona inúmeras possibilidades de elaboração de modelos de negócios, criando um ambiente fértil de fomento à inovação e ao empreendedorismo.

- ***ODS 10: Redução das desigualdades***

Não foram identificadas interações com o ODS 10 no SR1.5. O presente trabalho também não apresenta evidências de cobenefícios.

- ***ODS 11: Cidades e comunidades sustentáveis***

Não foram identificadas interações com o ODS 11 no SR1.5. O presente trabalho também não apresenta evidências de cobenefícios.

- ***ODS 12: Consumo e produção responsáveis***

O SR1.5 aponta uma sinergia para a adoção da tecnologia de BECCS com o ODS 12, no que diz respeito ao uso de bioenergia em substituição a combustíveis fósseis. O relatório aponta que a substituição por recursos fósseis renováveis reduz a depleção dos recursos fósseis, que são finitos. Contudo, a capacidade de armazenamento de CO₂ em reservatórios geológicos também é finita. Assim, o desenvolvimento de sistemas de CCS deve enfrentar uma contínua redução da disponibilidade de sítios de estocagem permanente de carbono.

No caso do sistema proposto, conforme citado para o ODS 3, é preciso avaliar com cautela a relação entre a adoção de BECCS e a redução do uso de recursos fósseis, particularmente o carvão mineral, dada a conjuntura brasileira.

Por outro lado, o elemento-chave de interesse para o sistema proposto é justamente o caráter circular do processo de aproveitamento das cinzas do carvão mineral. Consideradas atualmente um coproduto de baixo valor agregado, quando não um resíduo da queima do carvão em termelétricas, as cinzas tornam-se um insumo-chave do sistema de produção de zeólitas e uso na captura de CO₂. Com isso, o sistema proposto é capaz de promover os “3 R” clássicos da economia circular (KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017):

- ✓ **Redução:** ajustando pela demanda por zeólitas para captura de CO₂, o sistema proposto requer uma queima muito menor de carvão mineral em relação ao necessário para fins de geração de energia elétrica. Com isso, há uma redução da necessidade de lavra e queima de carvão.
- ✓ **Reuso:** o sistema propõe o aproveitamento das cinzas do carvão mineral, atualmente vistas como um resíduo ou coproduto de baixo valor agregado, como insumo básico na produção de zeólitas X, que possuem um valor de mercado consideravelmente superior.
- ✓ **Reciclagem:** o sistema proposto considera a reintrodução das cinzas residuais, geradas pela queima do carvão mineral, no processo da usina termelétrica, visando a captura do CO₂ gerado pelo próprio combustível fóssil.

- ***ODS 14: Vida na água***

Não foram identificadas interações com o ODS 14 no SR1.5. O presente trabalho também não apresenta evidências de cobenefícios.

- ***ODS 15: Vida na terra***

O SR1.5 aponta a possibilidade de a implementação de BECCS, associada à expansão de sistemas de bioenergia, ir de encontro aos preceitos do ODS 15, particularmente a proteção dos ecossistemas terrestres, o manejo sustentável de florestas, o combate ao desmatamento, a prevenção da perda de biodiversidade e o

controle da proliferação de espécies exógenas sobre as nativas. Especificamente para BECCS, o relatório destaca que o aumento do consumo de biomassa para compensar as penalidades energéticas pode ampliar tais impactos. Para o CCS fóssil, o SR1.5 não identifica interações diretas com o ODS 15.

Novamente, para o sistema proposto é importante considerar o contexto brasileiro. A existência de cadeias bioenergéticas de grande escala consolidadas no país enfraquece a obviedade da correlação entre a implementação de BECCS com a necessidade de expansão da bioenergia.

Por outro lado, o relatório desconsidera possíveis conflitos entre uma possível expansão de infraestrutura de movimentação de CO₂, seja de origem fóssil ou biogênica, particularmente pela construção de dutos de transporte de grande capacidade em longa distância, com a proteção de ecossistemas. Merschmann *et al.* (2016), Tagomori *et al.* (2018) e da Silva *et al.* (2018) realizaram estudos de análise de infraestrutura para BECCS, transportando CO₂ desde destilarias de etanol no Centro-Sul do Brasil para injeção em campos de petróleo offshore, verificando a necessidade de comissionar extensas malhas dutoviárias para atender ao serviço da melhor forma. Traçando um paralelo com a infraestrutura necessária para transporte de gás natural, a construção de uma malha dutoviária pode ir ao encontro de parâmetros de interesse para o ODS 15. Tal relação fica mais evidente na perspectiva oposta, em que os preceitos de conservação ambiental são comumente vistos como empecilhos ao desenvolvimento da infraestrutura energética pelos agentes do setor, como é o caso do Plano Indicativo de Gasodutos de Transporte, ou PIG, da EPE, que enumera os elementos de conservação ambiental dentre as “dificuldades construtivas” de novos gasodutos planejados (EPE, 2022b). Nesse sentido, são comuns os exemplos de conflitos entre a conservação ambiental e os interesses da indústria de energia no Brasil, particularmente sobre o bioma da Mata Atlântica (VIGLIO; CALVIMONTES; FERREIRA, 2017).

No caso da relação de aproveitamento de cinzas de carvão mineral para aproveitamento de zeólitas, também é importante destacar a potencial sinergia representada pelo repropósito desse recurso com os objetivos do ODS 15. As cinzas geradas na queima de carvão mineral em termelétricas são depositadas em aterros ou áreas abandonadas de mineração, quando não encontradas soluções comercialmente

atrativas para seu emprego, o que gera contaminação do ar, por material particulado, e de corpos hídricos, por efeito de lixiviação (DEPOI; POZEBON; KALKREUTH, 2008; SILVA, L. *et al.*, 2010). No caso das cinzas volantes geradas na UTEJLC, a indústria do cimento atualmente absorve quase sua totalidade, empregando-a na mistura do material compósito aglomerante (SNIC, 2019). Porém, as cinzas de fundo ainda não são comercialmente aproveitadas (DEPOI; POZEBON; KALKREUTH, 2008; SILVA, L. *et al.*, 2010). Aquino *et al.* (2017) sintetizaram zeólitas X de boa qualidade a partir de cinzas de fundo, apontando um caminho possível para emprego comercial desse resíduo. Além disso, há estudos para emprego de zeólitas de cinzas no tratamento da drenagem ácida de minas no Brasil (FUNGARO; IZIDORO, 2006; PAPROCKI, 2009), melhorando a qualidade da água local, em sinergia com o ODS 15.

- ***ODS 16: Paz, justiça e instituições eficazes***

Não foram identificadas interações com o ODS 16 no SR1.5. O presente trabalho também não apresenta evidências de cobenefícios.

- ***ODS 17: Parcerias e meios de implementação***

Não foram identificadas interações com o ODS 17 no SR1.5. O presente trabalho também não apresenta evidências de cobenefícios.

A Tabela 5.28 sumariza os cobenefícios apontados para o sistema proposto com os ODS, exceto o diretamente ligado à ação climática (ODS 13).

Tabela 5.28. Cobenefícios do sistema proposto de produção de zeólitas a partir de cinzas de carvão mineral para captura de CO₂






ODS	Cobenefícios do sistema proposto	
 <p>1 ERRADICAÇÃO DA POBREZA</p>	<ul style="list-style-type: none"> ↑ Geração de empregos verdes e renda para trabalhadores agrícolas ↑ Diversificação de fluxos de receitas para agricultores (créditos de carbono) ↑ Expansão do uso de uma fonte de energia moderna e do cultivo agrícola em terras marginais ↑ Manutenção de um nível mínimo operacional da cadeia produtiva do carvão mineral, mesmo no contexto da descarbonização, mantendo emprego e renda no setor ↑ Produção de zeólitas de cinzas de carvão mineral como alternativa econômica local para manutenção de emprego e renda de trabalhadores atualmente empregados na indústria carbonífera, no contexto da descarbonização 	
	 <p>2 FOME ZERO E AGRICULTURA SUSTENTÁVEL</p>	<ul style="list-style-type: none"> ↑ A adoção de sistemas de BECCS enquanto forma de remoção de carbono da atmosfera é de vital relevância para os esforços de mitigação de emissões de GEE, o que possibilita a redução de impactos da mudança do clima sobre a produção e o preço dos alimentos ↑ Sistemas de BECCS aumentam o potencial de descarbonização de sistemas de produção de bioenergia por unidade de uso da terra. Isso pode diminuir a necessidade de uso de biomassa para fins de mitigação, reduzindo a pressão da bioenergia sobre a produção e os preços dos alimentos
	 <p>3 SAÚDE E BEM-ESTAR</p>	<ul style="list-style-type: none"> ↑ Redução dos níveis necessários de lavra e queima de carvão mineral, reduzindo a poluição do ar, a contaminação de corpos hídricos e os riscos de acidentes associados à mineração do carvão mineral ↓ Trancamento tecnológico de um nível mínimo de atividade da cadeia produtiva do carvão mineral ↓ Riscos de vazamento de CO₂ nas atividades de transporte e armazenamento das cadeias de CCS fóssil e BECCS
	 <p>4 EDUCAÇÃO DE QUALIDADE</p>	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Não foram verificados cobenefícios do sistema proposto com este ODS.
 <p>5 IGUALDADE DE GÊNERO</p>	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Não foram verificados cobenefícios do sistema proposto com este ODS. 	

Tabela 5.28. Cobenefícios do sistema proposto de produção de zeólitas a partir de cinzas de carvão mineral para captura de CO₂

ODS	Cobenefícios do sistema proposto
 <p>6 ÁGUA POTÁVEL E SANEAMENTO</p>	<p>↑ Redução relativa do uso de água pela adoção de sistema otimizado de captura de CO₂ via TSA em relação à tecnologia benchmark de absorção química com aminas</p> <p>↑ Possível direcionamento de parte do excedente de produção de zeólitas para aplicações em tratamento de água e saneamento</p> <p>↓ Aumento do uso de água no segmento <i>upstream</i> das cadeias produtivas de carvão mineral e bioenergia, para compensar o consumo energético parasítico das unidades de captura de CO₂</p>
 <p>7 ENERGIA LIMPA E ACESSÍVEL</p>	<p>↑ Sistemas de CCS e BECCS proporcionam o acesso a fontes modernas de energia limpa, módicas e confiáveis</p> <p>↓ O consumo parasítico de energia dos sistemas de captura de CO₂ reduz a eficiência de aproveitamento dos recursos energéticos</p>
 <p>8 TRABALHO DECENTE E CRESCIMENTO ECONÔMICO</p>	<p>↑ Criação de uma cadeia produtiva para a fabricação de zeólitas a partir de cinzas de carvão mineral, proporcionando a oferta de empregos de qualidade e renda a trabalhadores do setor industrial, particularmente em locais que deveriam ser negativamente atingidos pelas tendências de descarbonização da economia</p> <p>↑ Oferta marginal de empregos operacionais e comerciais associados à cadeia produtiva de CCS e BECCS</p> <p>↓ Trancamento tecnológico de um nível mínimo de atividades na lavra de carvão mineral.</p>
 <p>9 INDÚSTRIA, INOVAÇÃO E INFRAESTRUTURA</p>	<p>↑ Vetor indutor da inovação radical nas indústrias envolvidas</p> <p>↑ Possibilidade de formulação de inúmeros tipos de modelos de negócio entre os diferentes atores da cadeia, particularmente os proprietários da termelétrica, da fábrica de zeólitas e das usinas de bioenergia</p>
 <p>10 REDUÇÃO DAS DESIGUALDADES</p>	<p>☐ Não foram verificados cobenefícios do sistema proposto com este ODS</p>
 <p>11 CIDADES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS</p>	<p>☐ Não foram verificados cobenefícios do sistema proposto com este ODS</p>
 <p>12 CONSUMO E PRODUÇÃO RESPONSÁVEIS</p>	<p>↑ Redução dos níveis necessários de queima de carvão mineral, com vistas ao mercado potencial de zeólitas</p> <p>↑ Reuso das cinzas de carvão mineral para a produção de zeólitas</p> <p>↑ Reciclo das cinzas de carvão mineral, na forma de zeólitas, para captura de CO₂ na queima do combustível para geração termelétrica</p>

Tabela 5.28. Cobenefícios do sistema proposto de produção de zeólitas a partir de cinzas de carvão mineral para captura de CO₂

ODS	Cobenefícios do sistema proposto
 <p>14 VIDA NA ÁGUA</p>	<input type="checkbox"/> Não foram verificados cobenefícios do sistema proposto com este ODS
 <p>15 VIDA TERRESTRE</p>	<p>↑ O uso de cinzas de carvão mineral para produção de zeólitas pode reduzir a poluição local induzida por depósitos de cinzas no ambiente</p> <p>↓ Possíveis conflitos entre a conservação ambiental e o desenvolvimento da infraestrutura para transporte de CO₂ associada à cadeia de CCS e BECCS</p>
 <p>16 PAZ, JUSTIÇA E INSTITUIÇÕES EFICAZES</p>	<input type="checkbox"/> Não foram verificados cobenefícios do sistema proposto com este ODS
 <p>17 PARCERIAS E MEIOS DE IMPLEMENTAÇÃO</p>	<input type="checkbox"/> Não foram verificados cobenefícios do sistema proposto com este ODS

Notas: ↑ = sinergia; ↓ = *trade-off*

Fonte: Elaboração própria

5.2.5 Implicações para a transição justa e propostas de políticas públicas para implementação do sistema

5.2.5.1 Contribuições do sistema proposto para a transição justa

A análise dos cobenefícios aponta que o sistema proposto apresenta mais interações sinérgicas com os objetivos do desenvolvimento sustentável do que *trade-offs*. Isso representa sua capacidade de conciliar uma série de interesses que muitas vezes são conflitantes, apresentando relativamente poucos efeitos adversos. Entre esses pontos, os de maior relevância no âmbito da transição justa são certamente aqueles associados ao ODS 1 e ao ODS 8. Nesse sentido, a criação de uma cadeia produtiva das zeólitas de cinzas representa o principal vetor com potencial de geração de emprego e renda que o sistema proposto proporciona.

No que concerne a geração de empregos, a partir da Tabela 5.14, é estimada a necessidade de 72 operadores por planta para produção de zeólitas em escala industrial. Contudo, o potencial de empregos que a produção de zeólitas pode proporcionar vai além do número de operadores da planta, se considerados também os funcionários de outras áreas, como a comercial, a administrativa e a de serviços de apoio. A FCCSA, tomada como referência para definição da escala no presente trabalho, emprega diretamente em torno de 230 funcionários (ANTUNES *et al.*, 2000). Além dos empregos diretos, há também a geração de empregos indiretos e empregos induzidos por efeito renda, que majoram o potencial de criação de empregos locais a partir da implementação de unidades de produção.

No que concerne a geração de renda local, assumindo o preço de mercado CIF para as zeólitas X (ver seção 5.2.3.1), uma única unidade industrial tem um potencial faturamento anual de US\$ 125 milhões. Para fins de comparação, o faturamento total do setor carbonífero em Santa Catarina em 2022 foi de aproximadamente US\$ 180 milhões (SIECESC, 2022).

Dessa forma, considerando que o potencial técnico da produção de zeólitas com as cinzas produzidas em uma termelétrica a carvão do porte da UTLC pode alimentar até 17 fábricas, a cadeia das zeólitas desenvolvida em sua plenitude

poderia gerar cerca de 4.000 empregos diretos e um faturamento anual superior a US\$ 2 bilhões, queimando muito menos carvão do que se realiza atualmente.

Para fins de comparação, em 2022 foram produzidos cerca de 6,2 milhões de toneladas ROM de carvão, posteriormente convertidas em 2,2 milhões de toneladas de carvão energético (SIECESC, 2022). O sistema proposto apresenta uma demanda de aproximadamente 1,1 milhão de toneladas de carvão por ano, ou seja, cerca de metade da produção obtida em 2022. Assumindo uma redução proporcional no número de empregos, isso representaria a perda de 1.250 postos de trabalho³⁴. Assim, quantitativamente, a indústria nascente poderia absorver os trabalhadores deslocados do setor pela redução da demanda por mineração. Entretanto, é importante ressaltar que isso requer programas de treinamento e requalificação, dado o caráter de inflexibilidade da mão-de-obra associada ao setor mineiro (ver seção 2.4.2). Isso requer a formulação de instrumentos de política pública nesse sentido, que são abordados na subseção seguinte.

5.2.5.2 Propostas de instrumentos de política pública

A análise de barreiras (seção 5.2.4.1) apresenta uma série de desafios para que se possa implementar um sistema tal qual o proposto, que não devem ser espontaneamente superados. Faz-se necessário, portanto, a elaboração de instrumentos de política pública que venham ao encontro das barreiras apontadas, permitindo a remoção ou redução dos obstáculos à implantação do sistema, para que a sociedade possa ser beneficiada pela ampla gama de cobenefícios que esse é capaz de proporcionar em termos de desenvolvimento sustentável.

Como todos os casos bem-sucedidos, a transição justa para a indústria carbonífera do sul do Brasil requer política industrial (GAMBHIR; GREEN; PEARSON, 2018). Isso é particularmente relevante para a superação das barreiras técnicas, que requerem instrumentos de política pública de fomento à tecnologia, ciência e inovação.

³⁴ Conforme apresentado na seção 3.3, o estado de Santa Catarina conta atualmente com 2.569 trabalhadores formalmente empregados nos setores de extração e beneficiamento de carvão mineral (DIEESE, 2022).

No caso específico do sistema proposto, os desafios principais são associados a provas de conceito para os processos que o compõe. É necessário incentivar estudos científicos e de engenharia para avaliação detalhada dos potenciais e limitações associados aos processos de captura de CO₂ via TSA, em condições reais de termelétricas a carvão mineral e a biomassa, de produção de zeólitas X a partir de cinzas de carvão mineral em escala industrial e da integração entre ambos. No caso do Brasil, a existência de plantas piloto, tanto para o processo de captura de CO₂ via TSA, quanto para a produção de zeólitas a partir de cinzas de carvão mineral, é um bom indicativo de que ambas as tecnologias ultrapassaram o primeiro grande desafio da cadeia de inovação, denominado “vale da morte tecnológico” (JENKINS; MANSUR, 2011). Nesse sentido, é preciso seguir investindo no desenvolvimento de estudos utilizando essas estruturas para responder a perguntas críticas para a tecnologia, permitindo seu desenvolvimento voltado a aplicações que venham de encontro à perspectiva da transição justa para a indústria carbonífera.

O desenho de sistema proposto nessa tese pode auxiliar nesse sentido, fornecendo uma possível visão estratégica de futuro para as tecnologias, como um arranjo produtivo não apenas bem alinhado a um contexto de economia de baixo carbono, mas prestando um dos serviços que serão essenciais à descarbonização. Juntando essa com as outras propostas de sistema e entendendo que as possibilidades não se limitam às elencadas no presente trabalho, a ideia de que há um conjunto de trajetórias possíveis para uma transição justa através de sistemas capazes de prover o serviço de RCA representa uma oportunidade para recriação da indústria carbonífera a partir de uma visão e dos valores pioneira no mundo. Assim sendo, propõe-se a criação de programas específicos para estudos e desenvolvimento de sistemas que utilizem a indústria carbonífera para oferecer serviços de RCA, em conjunto com os programas em desenvolvimento no âmbito do Polo de Transição Energética Justa do Sul do Estado de Santa Catarina.

No que tange as barreiras econômicas apresentadas para o sistema, é possível verificar que elas estão primordialmente associadas aos riscos tecnológicos do sistema. Nesse sentido, é necessário desenvolver um maior conhecimento das tecnologias para que se possa ter maior precisão sobre seus reais custos. A

implementação de plantas pioneiras para as tecnologias do sistema é essencial para que se possa pensar em mecanismos de financiamento adequados para a difusão das tecnologias do sistema, particularmente da captura de CO₂ em termelétricas a biomassa.

Sobre o financiamento da tecnologia, importa ressaltar que o sistema é voltado à transição justa para a indústria carbonífera, que pode ser considerada uma das principais pautas de oposição aos esforços de descarbonização. Com isso, no escopo da política industrial, é importante fazer constar mecanismos fiscais ou subsídios que enquadrem as tecnologias do sistema.

As barreiras de mercado, no que se refere à valorização dos serviços de mitigação de emissões de GEE, conectam-se às barreiras regulatórias, à medida em que o ponto fundamental em questão é a definição de um marco legal para um mercado de carbono no Brasil. Tal instrumento deve incluir as atividades de CCS fóssil e BECCS, reconhecendo seus diferentes papéis nos esforços de descarbonização da economia. Em termos da coordenação entre os atores, é importante que haja uma comunicação clara entre as diferentes partes envolvidas, de forma que o sistema proposto possa ser apresentado como uma possibilidade de integração entre as cadeias produtivas do carvão mineral, da bioenergia e do carbono, capaz de gerar uma relação ganha-ganha-ganha entre os três:

- a cadeia carbonífera ganha enquanto fornecedora de zeólitas a preços competitivos com o mercado global,
- a cadeia bioenergética ganha com a implantação de um sistema para captura de CO₂ com melhor performance tecnológica em relação à tecnologia benchmark e tendo um fornecedor nacional de adsorventes capaz de oferecer o produto a um preço competitivo com o mercado global, e
- a cadeia do carbono ganha com a entrada de mais fluxos de carbono oriundos da implementação de CCS e BECCS com a implementação da tecnologia TSA para captura de CO₂ com zeólitas sintetizadas de cinzas de carvão mineral.

Ainda sobre o desenvolvimento de mercado, é importante também estimular mercados alternativos para as zeólitas sintetizadas das cinzas de carvão mineral, que

não apenas o emprego na captura de CO₂. A existência dessas alternativas poderia dinamizar o setor, proporcionando um ambiente atrativo para a entrada de diferentes atores na cadeia de produção do adsorvente, tornando o segmento mais competitivo e propenso a inovações, além de menos dependente de uma atividade única.

Por fim, a superação das barreiras de capacitação e culturais requerem instrumentos de comunicação e formação das pessoas, que propiciem uma melhor compreensão das tecnologias envolvidas no sistema, incluindo sua relevância e os reais riscos e benefícios que elas proporcionam. Ainda, é importante que haja um esforço de reposicionamento da indústria carbonífera, deixando o estereótipo de poluidora e provando-se como um setor de onde é possível virem soluções que contribuam com os esforços pelo clima. No que se refere aos atores do setor de bioenergia, é importante manter canais de diálogo que os tragam clareza de sua relevância nos esforços de descarbonização da economia, particularmente nos papéis e potenciais do BECCS nos objetivos climáticos globais e da indústria de bioenergia na transição justa para o Brasil.

6 Conclusão

6.1 Principais Lições

O presente trabalho contesta a hipótese de que não há espaço para a indústria carbonífera em um mundo de emissões líquidas nulas de GEE. Para fazer tal contraponto, propõe-se que a própria descarbonização pode criar oportunidades para transição da indústria do carvão, em função de sua relação intrínseca com o ciclo do carbono. Para tanto, é estabelecido um objetivo de propor e avaliar ao menos uma forma inovadora com a qual a indústria carbonífera pode contribuir com os esforços de descarbonização.

Uma revisão da literatura científica aponta que, por um lado, a transição energética do século XXI, norteadada pela descarbonização, requer tanto uma redução drástica do consumo de combustíveis fósseis, quanto o desenvolvimento de sistemas capazes de remover carbono da atmosfera em grande escala. Por outro lado, o elemento de justiça na transição é crucial para a viabilidade de um caminho para transição energética, de maneira que se define a transição justa como aquela que “não deixa ninguém para trás”. Isso implica uma atuação política sobre os setores que perdem espaço na descarbonização, especialmente sobre as regiões cuja economia depende sobremaneira das atividades associadas à cadeia do carvão mineral. Tal atuação pode ocorrer via instrumentos de duas naturezas. Uma é a reativa, que contempla medidas compensatórias para mitigação de impactos socioeconômicos de curto prazo. A outra é a proativa, que inclui uma política industrial de fomento à criação de arranjos produtivos locais adaptados ao contexto da descarbonização, evitando a criação de uma dependência de políticas compensatórias no longo prazo. E, para a política industrial, experiências pretéritas mostram que a inovação é fundamental para a identificação de oportunidades para novas tecnologias e negócios que valorizem as vantagens comparativas locais, ou seja, a combinação das competências com os fatores de produção disponíveis.

Apoiado nesse arcabouço conceitual, esse trabalho traz três propostas de sistemas inovadores com o potencial de prover serviços de RCA, em que a indústria carbonífera participa como uma peça-chave. Tais propostas inspiram-se na metáfora

proposta por Szklo e Schaeffer (2006), propondo a descarbonização como uma “Lança de Peleu” para a indústria do carvão, ou seja, podendo ser a cura do ferimento que ela própria infligiu.

O primeiro dos três sistemas propostos é um arranjo produtivo em que o carvão mineral é queimado em uma usina termelétrica para produzir cinzas, sendo essas cinzas utilizadas como insumo principal na síntese de zeólitas voltadas à captura de CO₂ pós-combustão. Assim, propõe-se a introdução de um sistema de captura por adsorção em regime TSA, a princípio, para abater as emissões na própria termelétrica que gera as cinzas. Contudo, como o autoconsumo de adsorvente pela unidade de captura na planta a carvão é relativamente baixo em relação ao potencial de produção de zeólitas, propõe-se o direcionamento dos excedentes para captura em termelétricas a biomassa, de onde o sistema logra um saldo líquido de emissões negativas de CO₂ pela adoção de BECCS. Esse primeiro sistema é apresentado em maior nível de detalhamento do que os demais, visto que foi selecionado para uma avaliação técnico-econômica aplicada a um estudo de caso para o estado de Santa Catarina.

O segundo sistema proposto envolve a "mineração reversa de carbono," onde a biomassa seria convertida em biochar e armazenada em minas de carvão deplecionadas. Isso aproveitaria a infraestrutura existente da mineração de carvão e poderia oferecer empregos aos trabalhadores desse setor consideravelmente afetado pela descarbonização, em linha com os preceitos da transição justa. Além disso, ao contrário das aplicações mais estudadas para o biochar na agricultura, este sistema proposto se concentra em usos mais intensivos do produto, incentivando operações em larga escala e, conseqüentemente, redução de custos.

O terceiro sistema propõe o coaproveitamento abatido de carvão mineral com biomassa, visando a geração de cinzas com pegada de carbono negativa para neutralizar as emissões do cimento. A introdução da captura de CO₂ em processos de coaproveitamento energético de biomassa com carvão mineral tem o potencial de gerar emissões negativas, dependendo da proporção de carbono renovável na mistura dos combustíveis e do nível de captura do CO₂. Por outro lado, as cinzas de carvão mineral são usualmente empregadas como adição no cimento para reduzir

seu teor de clínquer, diminuindo sua pegada de carbono. Assim, a ideia é alocar as emissões negativas às cinzas, tornando sua pegada de carbono negativa, de forma que sua incorporação ao cimento poderia neutralizar sua pegada de carbono. Com isso, cria-se uma relação de ecologia industrial entre os setores de cimento, biomassa e carvão mineral. Dessa forma, o sistema proposto fornece um caminho de transição justa para a indústria carbonífera em que ela contribui para os esforços de descarbonização, particularmente em um setor de difícil abatimento.

O estudo de caso oferece uma abordagem abrangente para o primeiro sistema proposto, aplicada ao contexto da indústria carbonífera de Santa Catarina. Ele engloba diversas dimensões, incluindo uma análise técnico-econômica do modelo de sistema, a identificação de barreiras e cobenefícios relacionados à sua implementação e uma avaliação de suas implicações para uma transição justa, no que concerne à geração local de emprego e renda. Além disso, o estudo inclui propostas de políticas públicas relevantes para implementação desse sistema.

A análise técnico-econômica revela que a produção em escala industrial de zeólitas X a partir de cinzas de carvão mineral é economicamente viável, com custos consideravelmente menores em comparação com o valor atual de mercado. No que diz respeito à captura de CO₂, a tecnologia TSA tende a ter um menor impacto no custo da geração elétrica nas usinas termelétricas, em comparação com o benchmark tecnológico baseado na absorção química. No entanto, a menor eficiência da tecnologia benchmark implica a queima de mais combustível e geração de mais CO₂, causando um efeito de diluição que pode significar um custo inferior do processo por unidade de CO₂, ainda que consuma mais energia e emita mais CO₂. Isso faz do indicador de custo por unidade de CO₂ não necessariamente a melhor métrica de seleção da tecnologia de captura.

Outra avaliação realizada aborda a produção de zeólitas de cinzas de carvão necessária para suprir o autoconsumo e venda a outros agentes, a fim de cobrir os custos de captura de CO₂ e operações da usina termelétrica. Isso depende do cenário de preços das zeólitas. Com base no preço atual de mercado FOB, a captura de CO₂ seria paga com uma produção acima de 38 mil toneladas anuais de zeólitas, enquanto a cobertura dos custos da operação da usina termelétrica fóssil exigiria

pelo menos 118 mil toneladas anuais de zeólitas. Isso sugere que, com um mercado para pelo menos 5 plantas industriais de zeólitas X, a usina termelétrica a carvão mineral poderia operar independentemente da venda de energia elétrica, se tornando uma indústria química. Se esse mercado fosse exclusivamente voltado para a captura de CO₂ em usinas de bioenergia, seria necessário atender a pelo menos 42 usinas a resíduo de eucalipto ou 55 usinas a bagaço de cana-de-açúcar para que a receita das vendas de zeólitas pudesse cobrir totalmente os custos da operação.

Por fim, os resultados do estudo de caso para o sistema proposto apresentam um grande potencial de contribuir para uma transição justa da indústria da indústria carbonífera de Santa Catarina. As estimativas mostram um potencial de geração de empregos pela cadeia de zeólitas supera em quase duas vezes as perdas no setor de mineração, enquanto o faturamento pode ser mais de dez vezes superior. Ademais, a implementação desse sistema para promover a descarbonização tende a estar em sinergia com a maioria dos ODS, mas enfrenta desafios significativos em várias frentes, incluindo barreiras técnicas, econômicas, regulatórias e culturais. A superação dessas barreiras exigiria a implantação de um arcabouço de política pública industrial, que promovesse desenvolvimento das tecnologias do sistema, apoio para mercados de carbono, envolvimento dos atores relevantes e disseminação de informações e capacitação sobre os benefícios e riscos do sistema proposto em relação a uma transição justa para uma economia de baixo carbono no estado.

Em suma, este estudo aponta caminho para a transição justa da indústria carbonífera, que passam pela recriação da missão e dos valores dessa indústria no sentido de que ela pode atuar ativamente em prol dos esforços de descarbonização. Os sistemas propostos indicam que há, inclusive, possíveis arranjos produtivos para a prestação de serviços essenciais aos esforços de descarbonização que incluem a indústria carbonífera como uma peça-chave. O estudo de caso para Santa Catarina, por sua vez, mostra que tais arranjos podem tanto ser viáveis economicamente, quanto vetores de indução da geração de emprego e renda localmente, permitindo uma transição energética justa para a indústria carbonífera. Contudo, a implementação desses sistemas é desafiadora em diversas dimensões, requerendo assim esforços no desenvolvimento de políticas industriais, com uma visão clara da

indústria carbonífera não como um antagonista natural, mas como um possível agente de transformação para uma economia neutra em emissões de GEE.

6.2 Limitações

Em termos de escopo, o trabalho não tem por finalidade abranger todos os caminhos possíveis que levam a uma transição justa para a indústria carbonífera. O recorte do trabalho dá-se para sistemas em que o caminho da transição se faz com a indústria carbonífera contribuindo para os esforços de descarbonização, particularmente pela prestação de serviço de RCA. Ainda assim, vale o reconhecimento de que os sistemas aqui propostos não representam as únicas oportunidades nessa perspectiva.

Do ponto de vista metodológico, entende-se como uma limitação a análise detalhada em um estudo de caso aplicado de apenas um dos três tipos de sistemas propostos. Entende-se que a análise detalhada dos demais sistemas poderia trazer elementos que certamente seriam relevantes para as discussões sobre transição energética justa. Essa análise deverá compor estudos futuros para além do escopo aplicado dessa tese.

Com respeito ao sistema analisado no estudo de caso aplicado a Santa Catarina, a fim de consolidar os principais elementos associados ao sistema proposto em uma avaliação integrada, fez-se necessário assumir premissas simplificadoras, sobretudo no que se refere à modelagem técnica dos sistemas. No geral, essas limitações devem ser levadas em consideração ao analisar os resultados deste estudo, e futuras pesquisas são necessárias para abordar essas limitações e expandir o conhecimento sobre o sistema proposto em diferentes contextos e escalas. Particularmente, o baixo grau de desenvolvimento industrial da tecnologia de captura de CO₂ via TSA limita a disponibilidade de dados confiáveis e precisos para a análise, tornando necessárias hipóteses da literatura de engenharia de processo para ganhos de escala, por exemplo. Além disso, devido à natureza inovadora da tecnologia em questão, existem limitações relacionadas à falta de estudos de caso e experiências práticas de longo prazo. Tal aspecto também se aplica à análise do processo de produção de zeólitas a partir de cinzas de carvão mineral em escala industrial, que carece de experiências de aplicação prática.

Ainda sobre o estudo de caso, é importante reforçar que o estudo se concentrou em uma escala de avaliação local, considerando uma única planta industrial. Portanto, os resultados obtidos, sobretudo quantitativos, valem para o caso avaliado, podendo não ser generalizáveis para outras regiões geográficas ou escalas de produção diferentes. Também é importante considerar a incerteza que fatores externos trazem aos resultados obtidos, sobretudo os de natureza econômico-financeira. Mudanças nas políticas governamentais, regulamentações ambientais e condições econômicas podem afetar a viabilidade e a implementação do sistema proposto. Essas variáveis externas estão além do controle deste estudo e podem ter impactos significativos nos resultados e nas conclusões.

Por fim, é importante mencionar que este estudo se baseou em dados e informações disponíveis até a data de corte estabelecida. Novos avanços tecnológicos, descobertas científicas ou mudanças no estado da arte podem ocorrer após essa data e podem ter implicações importantes no contexto deste estudo. Portanto, é necessário considerar essas limitações temporais ao interpretar os resultados e as conclusões obtidas.

6.3 Recomendações para estudos futuros

Verificadas as limitações do trabalho, a primeira recomendação para estudos futuros é a de replicar as análises propostas no estudo de caso para os demais sistemas propostos nesta tese. Na mesma linha, recomenda-se que sejam propostos outros arranjos produtivos inovadores nos quais a indústria carbonífera possa participar ativamente dos esforços de descarbonização.

No que se refere ao sistema para produção de zeólitas a partir de cinzas de carvão mineral para captura de CO₂ na termelétrica fóssil e em usinas a bioenergia, é possível também elencar um conjunto mais amplo de sugestões específicas para refinar os resultados e dar sequência ao desenvolvimento da proposta.

Do ponto de vista da avaliação de engenharia do sistema, propõe-se um refinamento técnico da modelagem dos sistemas de captura de CO₂ em um ambiente de simulação mais robusto que o IECM. Assim, será possível analisar mais detalhadamente a integração energética do processo e as repercussões do uso de

diferentes *designs* de reatores para captura de CO₂, considerando diferentes tipos de combustíveis fósseis ou renováveis. Uma análise de simulação mais robusta também permite uma melhor customização do processo de adsorção com as zeólitas propostas nesta tese, sobretudo do modelo de isoterma, podendo apontar as melhores condições de operação para que se atinjam os patamares desejados de desempenho para a planta de captura. Nesse sentido, é importante também atualizar periodicamente os parâmetros de desempenho do processo, conforme novas informações técnicas sejam obtidas com o aprendizado tecnológico. Isso também requer estudos futuros de natureza experimental, para que se possam obter os devidos parâmetros de alimentação das simulações. Isso vale tanto para o processo de captura de CO₂ via TSA nas termelétricas fósseis e a biomassa, quanto para a produção de zeólitas em escalas superiores.

No que tange o desenvolvimento tecnológico do sistema, recomenda-se a realização de um estudo de *Roadmap* tecnológico para a captura de CO₂ com zeólitas sintetizadas de cinzas de carvão mineral. Com isso, pode-se identificar os principais desafios e etapas necessárias para a implementação eficiente e em larga escala do sistema proposto, dentro de um horizonte temporal compatível com o que a urgência climática requer. Além disso, os demais sistemas propostos também poderiam ser incluídos em estudos desta natureza.

Além disso, seria interessante realizar estudos adicionais sobre a viabilidade ambiental do sistema proposto. Isso poderia envolver uma análise do ciclo de vida completo, avaliando o impacto ambiental desde a extração do carvão mineral até a disposição final das zeólitas utilizadas na captura de CO₂. Seria importante considerar os aspectos de emissões de gases de efeito estufa, consumo de recursos naturais e potenciais impactos no solo, água e ecossistemas locais. Vale ressaltar que a síntese das zeólitas requer o uso de materiais produzidos a partir de processos energointensivos, como a soda cáustica e o aluminato de sódio, sendo importante levar isso em consideração para atestar o benefício ambiental da cadeia produtiva em questão.

Outra recomendação de estudo futuro seria investigar de forma mais aprofundada o impacto socioeconômico local decorrente da implementação do

sistema proposto vis-à-vis um cenário de *phase-out* total da indústria do carvão. Para tanto, poderiam ser empregadas metodologias com matrizes insumo-produto para análise integrada dos choques econômicos decorrentes dessas premissas. Tais estudos são relevantes para avaliar quantitativamente o benefício do sistema proposto enquanto alternativa econômica para a transição justa da indústria do carvão mineral.

Além disso, é importante considerar estudos de implementação e integração do sistema proposto em termos de infraestrutura existente. Isso envolveria a avaliação da adaptação e modificação de instalações existentes, como termelétricas e usinas de bioenergia, para incorporar o sistema de captura de CO₂ e a produção de zeólitas. Seriam necessárias análises de viabilidade técnica, engenharia de projeto e planejamento estratégico de infraestrutura para avaliar os reais requisitos para implementação do sistema. No que tange a infraestrutura, é de suma importância análises que tratem do planejamento de redes de transporte para o CO₂.

Por fim, é de interesse explorar possíveis aplicações adicionais das zeólitas sintetizadas a partir das cinzas de carvão mineral. Estudos poderiam ser realizados para investigar o uso dessas zeólitas em outras indústrias, como purificação de água e tratamento de efluentes, agricultura, catálise heterogênea ou separação de gases. Isso poderia abrir novas oportunidades de mercado e contribuir para a sustentabilidade e diversificação da indústria.

Referências

- ABBASS, K.; QASIM, M. Z.; SONG, H.; MURSHED, M.; MAHMOOD, H.; YOUNIS, I. A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 29, n. 28, p. 42539–42559, 2022.
- ABIQUIM. *Brazilian Chemicals*. Disponível em: <<https://brachem.abiquim.org/INDEX/>>. Acesso em: 5 mar. 2023.
- AIL, S. S.; DASAPPA, S. Biomass to liquid transportation fuel via Fischer Tropsch synthesis - Technology review and current scenario. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 58, p. 267–286, 2016.
- ALELUIA REIS, L.; TAVONI, M. Glasgow to Paris—The impact of the Glasgow commitments for the Paris climate agreement. *iScience*, v. 26, n. 2, p. 105933, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.105933>>.
- ALLEN, R. C. Backward into the future: The shift to coal and implications for the next energy transition. *Energy Policy*, v. 50, p. 17–23, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.03.020>>.
- ANAWAR, H. M.; AKTER, F.; SOLAIMAN, Z. M.; STREZOV, V. Biochar: An Emerging Panacea for Remediation of Soil Contaminants from Mining, Industry and Sewage Wastes. *Pedosphere*, v. 25, n. 5, p. 654–665, 2015. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)30046-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1002-0160(15)30046-1)>.
- ANEEL. *Histórico do Setor Elétrico*. Disponível em: <<https://caminhosregulacao.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 22 out. 2023.
- ANEEL. *Resolução Normativa 482*. . Brasil: [s.n.], 2012
- ANEEL. *Sistema de Informações Geográficas do Setor Elétrico - SIGEL*. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOiR9>>. Acesso em: 6 mar. 2023.
- ANM - AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. *Observatório da CFEM*.

Disponível em:

<<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiZDA5NGMyYmYtOWQyMi00NzA1LWFhOTQtNmU5NjEyMTI3ZDMxIiwidCI6ImEzMDgzZTIxLTc0OWItNDUzNC05YWZhLTU0Y2MzMTg4OTdiOCJ9&pageName=ReportSection7a43f884dc43352e5953>>.

Acesso em: 24 out. 2023a.

ANM - AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. *Quantitativo e porte das minas e usinas, e captações e complexos de água mineral em operação*. Disponível em:

<<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiZTRkNjI3MWEtMGI3My00ZTgzLWlyN2YtMzNjNDhjNTViM2Q2IiwidCI6ImEzMDgzZTIxLTc0OWItNDUzNC05YWZhLTU0Y2MzMTg4OTdiOCJ9&pageName=ReportSection99c5eaca1c0e9e21725a>>. Acesso

em: 23 out. 2023b.

ANTUNES, A. M. S.; DE SOUZA, C. M. G.; CHAMAS, C. I.; SOUSA-AGUIAR, E. F.; DUTRA, L. E. D. The Brazilian FCC catalyst plant: An example of a successful joint venture between Petrobras and Akzo bringing about technological innovation. *Journal of Technology Transfer*, v. 25, n. 1, p. 37–42, 2000.

AQUINO, T. F. DE; ESTEVAM, S. T.; VIOLA, V. O.; MARQUES, C. R. M.; ZANCAN, F. L.; VASCONCELOS, L. B.; RIELLA, H. G.; PIRES, M. J. R.; MORALES-OSPINO, R.; TORRES, A. E. B.; BASTOS-NETO, M.; CAVALCANTE, C. L. CO₂ adsorption capacity of zeolites synthesized from coal fly ashes. *Fuel*, v. 276, n. May 2019, p. 118143, set. 2020. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118143>>.

AQUINO, T. F. DE; ESTEVAM, S. T.; CORRÊA, G. R.; MARQUES, C. R. M.; MELO, A. R.; MARCELLO, R. R.; PIRES, M.; HAMMERSCHMITT, M. E.; RIELLA, H. G. Síntese de Zeólitas do Tipo X a Partir de Cinzas Volantes e de Fundo de Carvão Mineral. 2017, Criciúma: V Congresso Brasileiro de Carvão Mineral, 2017. Disponível em: <<http://www.swge.inf.br/ANAIS/CBCM2017/PDF/CBCM2017-0111.PDF>>.

AQUINO, T. F. DE. *Síntese de Zeólitas do Tipo x a Partir de Cinzas Volantes e de Fundo de Carvão Mineral para a Captura de CO₂*. 2018. 200 f. Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.

AQUINO, T. F. DE; ESTEVAM, S. T.; MELO, C. R.; MELO, A. R.; MARCELLO, R.

R.; PIRES, M.; FERRARINI, S. F.; COSTA, B. M. DA; RIELLA, H. G. Study of the fusion step in the synthesis of pure zeolites using coal ashes. 2016, Rio de Janeiro: 18th International Zeolite Conference, 2016. p. 2–3.

ARABADZHYAN, A.; FIGINI, P.; GARCÍA, C.; GONZÁLEZ, M. M.; LAM-GONZÁLEZ, Y. E.; LEÓN, C. J. Climate change, coastal tourism, and impact chains—a literature review. *Current Issues in Tourism*, v. 24, n. 16, p. 2233–2268, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/13683500.2020.1825351>>.

BACEN. *Estatísticas sobre câmbio*. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/estatisticas/estatisticascambio>>. Acesso em: 28 mar. 2023.

BALAT, M.; BALAT, M.; KIRTAY, E.; BALAT, H. Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 1: Pyrolysis systems. *Energy Conversion and Management*, v. 50, n. 12, p. 3147–3157, 2009.

BAPTISTA, L. B.; SCHAEFFER, R.; VAN SOEST, H. L.; FRAGKOS, P.; ROCHEDO, P. R. R.; VAN VUUREN, D.; DEWI, R. G.; IYER, G.; JIANG, K.; KANNAVOU, M.; MACALUSO, N.; OSHIRO, K.; PARK, C.; REEDMAN, L. J.; SAFONOV, G.; SHEKHAR, S.; SIAGIAN, U.; SURANA, K.; QIMIN, C. Good practice policies to bridge the emissions gap in key countries. *Global Environmental Change*, v. 73, n. December 2020, p. 102472, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2022.102472>>.

BELOLLI, M.; QUADROS, J.; GUIDI, A. *História do Carvão de Santa Catarina*. 1. ed. Criciúma: Imprensa Oficial do Estado de Santa Catarina, 2002.

BERKENPAS, M. B.; FRY, J. J.; KIETZKE, K.; RUBIN, E. S. *IECM User Documentation: User Manual*. . Pittsburgh: The Integrated Environmental Control Model Team. , 2018

BERRANG-FORD, L.; SIDERS, A. R.; LESNIKOWSKI, A.; FISCHER, A. P.; CALLAGHAN, M. W.; ABU, T. Z.; et al. A systematic global stocktake of evidence on human adaptation to climate change. *Nature Climate Change*, v. 11, n. 11, p. 989–1000, 2021.

BIAŁECKA, B.; CEMPA, M.; ADAMCZYK, Z.; ŚWINDER, H.; KRAWCZYK, P. Cost-effectiveness analysis and cost-benefit analysis for X-type zeolite production from fly ash. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi / Mineral Resources Management*, v. 38,

n. 3, p. 83–103, 2022.

BOLDT, J.; NYGAARD, I.; HANSEN, U. E.; TRÆRUP, S. L. M. *Overcoming Barriers to the Transfer and Diffusion of Climate Technologies*. Disponível em: <<http://www.tech-action.org/Publications/TNAGuidebooks>>.

BONETTI, B.; WALDOW, E. C.; TRAPP, G.; HAMMERCSHMITT, M. E.; FERRARINI, S. F.; PIRES, M. J. R.; ESTEVAM, S. T.; AQUINO, T. F. D. Production of zeolitic materials in pilot scale based on coal ash for phosphate and potassium adsorption in order to obtain fertilizer. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, n. 3, p. 2638–2654, 2021.

BONETTI, B.; FERRARINI, S. F.; HAMMERCSHMITT, M. E.; DE AQUINO, T. F.; PEZENTE, D. P.; DOS SANTOS ZAVARIZE, M.; PIRES, M. J. R. Use of pilot scale produced zeolites as fertilizer. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 10, n. 3, 2022.

BORBA, B. S. M. C.; LUCENA, A. F. P.; RATHMANN, R.; COSTA, I. V. L.; NOGUEIRA, L. P. P.; ROCHEDO, P. R. R.; CASTELO BRANCO, D. A.; JÚNIOR, M. F. H.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. Energy-related climate change mitigation in Brazil: Potential, abatement costs and associated policies. *Energy Policy*, v. 49, n. 2012, p. 430–441, 2012.

BOYCHEVA, S.; MARINOV, I.; ZGUREVA-FILIPOVA, D. Studies on the CO₂ Capture by Coal Fly Ash Zeolites: Process Design and Simulation. *Energies*, v. 14, n. 24, p. 8279, 8 dez. 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/14/24/8279>>.

BOYD, A. Informing international UNFCCC technology mechanisms from the ground up: Using biogas technology in South Africa as a case study to evaluate the usefulness of potential elements of an international technology agreement in the UNFCCC negotiations process. *Energy Policy*, v. 51, p. 301–311, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.08.020>>.

BRASIL. *LEI Nº 14.299, DE 5 DE JANEIRO DE 2022. Altera as Leis nºs 10.438, de 26 de abril de 2002, e 9.074, de 7 de julho de 1995, para instituir subvenção econômica às concessionárias do serviço público de distribuição de energia elétrica de pequeno porte; cria.* . Brasília: Presidência da República, Secretaria-Geral, Subchefia para

Assuntos Jurídicos. Disponível em: <[BRASIL. *Opções Transversais para Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa - Captura, Transporte e Armazenamento de Carbono*. 1. ed. Brasília: Ministério de Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, ONU Meio Ambiente, 2017. v. 1.](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/114299.htm#:~:text=L14299&text=Altera as Leis n°s 10.438,)%3B e dá outras providências.>. , 2022</p></div><div data-bbox=)

BRASIL. *RenovaBio*. Disponível em:

<<http://antigo.mme.gov.br/web/guest/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/acoes-e-programas/programas/renovabio>>.

BRAUN, C. Not in My Backyard: CCS Sites and Public Perception of CCS. *Risk Analysis*, v. 37, n. 12, p. 2264–2275, 2017.

BRIDLE, R.; KITSON, L.; DUAN, H.; SANCHEZ, L.; MERRILL, T. *At the crossroads: balancing the financial and social costs of coal transition in China*. .

Winnipeg, Manitoba: [s.n.], 2017. Disponível em:

<<https://www.iisd.org/system/files/publications/crossroads-balancing-financial-social-costs-coal-transition-china.pdf>>0Ahttps://www.iisd.org/system/files/publications/crossroads-balancing-financial-social-costs-coal-transition-china.pdf>.

BROWN, M. T. *Caracterização Petrológica e Química dos Carvões utilizados em Usinas Termelétricas Brasileiras e as Cinzas geradas no processo de Combustão*. 2011. 100 f. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

BRUNDTLAND, G. H. Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development. 1987, [S.l: s.n.], 1987. p. 300.

BUI, M.; ADJIMAN, C. S.; BARDOW, A.; ANTHONY, E. J.; BOSTON, A.; BROWN, S.; FENNEL, P. S.; FUSS, S.; GALINDO, A.; HACKETT, L. A.; HALLETT, J. P.; HERZOG, H. J.; JACKSON, G.; KEMPER, J.; KREVER, S.; MAITLAND, G. C.; MATUSZEWSKI, M.; METCALFE, I. S.; PETIT, C.; PUXTY, G.; REIMER, J.; REINER, D. M.; RUBIN, E. S.; SCOTT, S. A.; SHAH, N.; SMIT, B.; TRUSLER, J. P. M.; WEBLEY, P.; WILCOX, J.; MAC DOWELL, N. Carbon capture and storage (CCS): The way forward. *Energy and Environmental Science*, v. 11, n. 5, p. 1062–1176, 2018.

- BURNHAM, A.; HAN, J.; CLARK, C. E.; WANG, M.; DUNN, J. B.; PALOU-RIVERA, I. Life-cycle greenhouse gas emissions of shale gas, natural gas, coal, and petroleum. *Environmental Science and Technology*, v. 46, n. 2, p. 619–627, 2012.
- BUSTAMANTE, M.; ROBLEDO-ABAD, C.; HARPER, R.; MBOW, C.; RAVINDRANAT, N. H.; SPERLING, F.; HABERL, H.; PINTO, A. DE S.; SMITH, P. Co-benefits, trade-offs, barriers and policies for greenhouse gas mitigation in the agriculture, forestry and other land use (AFOLU) sector. *Global Change Biology*, v. 20, n. 10, p. 3270–3290, 2014.
- BUTNAR, I.; BROAD, O.; SOLANO RODRIGUEZ, B.; DODDS, P. E. The role of bioenergy for global deep decarbonization: CO₂ removal or low-carbon energy? *GCB Bioenergy*, v. 12, n. 3, p. 198–212, 2020.
- ÇABUKOĞLU, E.; GEORGES, G.; KÜNG, L.; PARESCHI, G. Battery electric propulsion : An option for heavy-duty vehicles ? Results from a Swiss case-study. *Transportation Research Part C*, v. 88, n. January, p. 107–123, 2018.
- ÇABUKOĞLU, E.; GEORGES, G.; KÜNG, L.; PARESCHI, G. Fuel cell electric vehicles : An option to decarbonize heavy-duty transport ? Results from a Swiss case-study. *Transportation Research Part D*, v. 70, p. 35–48, 2019.
- CANTARELLA, H.; NASSAR, A. M.; CORTEZ, L. A. B.; BALDASSIN, R. Potential feedstock for renewable aviation fuel in Brazil. *Environmental Development*, v. 15, p. 52–63, 2015.
- CARLEY, S.; EVANS, T. P.; GRAFF, M.; KONISKY, D. M. A framework for evaluating geographic disparities in energy transition vulnerability. *Nature Energy*, v. 3, n. 8, p. 621–627, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/s41560-018-0142-z>>.
- CARVALHO, F.; SILVA, F. T. F.; SZKLO, A.; PORTUGAL-PEREIRA, J. Potential for biojet production from different biomass feedstocks and consolidated technological routes: a georeferencing and spatial analysis in Brazil. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, p. bbb.2041, ago. 2019.
- CASAN. *Publicação da Nova Estrutura Tarifária*. Disponível em: <[https://www.casan.com.br/ckfinder/userfiles/files/Documentos_Download/Tabela_Nova_estrutura\(1\).pdf](https://www.casan.com.br/ckfinder/userfiles/files/Documentos_Download/Tabela_Nova_estrutura(1).pdf)>. Acesso em: 9 jun. 2023.

CASTELLAN, G. W. *Physical chemistry*. 3. ed. Reading, Massachussets: Addison-Wesley Publishing Company, 1983.

CAVALETT, O.; ORTEGA, E. Integrated environmental assessment of biodiesel production from soybean in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 18, n. 1, p. 55–70, 2010.

CCEE. *Memória de cálculo de reembolso de carvão mineral 2020 - ENGIE/DIAMANTE*. Disponível em:

<[https://www.ccee.org.br/documents/80415/919412/2021.01.12 Reembolso Diamante 2020_v2.xlsx/017c96f4-8b66-8ab4-80f4-763d20784265](https://www.ccee.org.br/documents/80415/919412/2021.01.12%20Reembolso%20Diamante%20v2.xlsx/017c96f4-8b66-8ab4-80f4-763d20784265)>. Acesso em: 10 jun. 2023.

CCEE - CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. *Conceitos de preço*. Disponível em: <<https://www.ccee.org.br/precos/conceitos-precos>>. Acesso em: 26 out. 2023a.

CCEE - CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. *Memória de cálculo de reembolso de carvão mineral 2022*. Disponível em:

<<https://www.ccee.org.br/web/guest/acervo-ccee>>. Acesso em: 23 out. 2023b.

CCEE - CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. *Módulo 3 – Conta de Desenvolvimento Energético - CDE*. . São Paulo: [s.n.], 2022. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/documents/80415/919498/PdCS_modulo_3_-_CDE_v_10.0.pdf/ad93dd2e-c4ca-9004-b1bb-d618d960e39b>.

CCS BRASIL. *1º Relatório Anual de CCS no Brasil 2022/2023*. . São Paulo: [s.n.], 2023. Disponível em: <<https://www.ccsbr.com.br/relatorios-anuais>>.

CELTA BRASIL. *Website da Celta Brasil*. Disponível em:

<<https://www.celtabrasil.com.br/>>. Acesso em: 5 mar. 2023.

CGEE. Roadmap tecnológico para produção, uso limpo e eficiente do carvão mineral nacional: 2012 a 2035. *Série Documentos Técnicos*, p. 132, 2012.

CHAN, W. H.; MAZLEE, M. N.; AHMAD, Z. A.; ISHAK, M. A. M.; SHAMSUL, J. B. The development of low cost adsorbents from clay and waste materials: a review. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 19, n. 1, p. 1–14, 2017.

CHAVES, A. P. Os problemas do carvão em geral e do carvão brasileiro em particular. In: SOARES, P. S. M.; SANTOS, M. D. C. DOS; POSSA, M. V. (Org.). . *Carvão*

Brasileiro: Tecnologia e Meio Ambiente. 1. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. p. 300.

CHEMICAL ENGINEERING. *Chemical Engineering Plant Cost Index*.

CHEN, C.; HABERT, G.; BOUZIDI, Y.; JULLIEN, A. Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation. *Journal of Cleaner Production*, v. 18, n. 5, p. 478–485, 2010.

CHUE, K. T.; KIM, J. N.; YOO, Y. J.; CHO, S. H.; YANG, R. T. Comparison of Activated Carbon and Zeolite 13X for CO₂ Recovery from Flue Gas by Pressure Swing Adsorption. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 34, n. 2, p. 591–598, fev. 1995. Disponível em: <<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie00041a020>>.

CIPILET, D.; HARRISON, J. L. Transition tensions: mapping conflicts in movements for a just and sustainable transition. *Environmental Politics*, v. 29, n. 3, p. 435–456, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/09644016.2019.1595883>>.

CLARKE, L.; WEI, Y.-M.; NAVARRO, A. D. L. V.; GARG, A.; HAHMANN, A. N.; KHENNAS, S.; AZEVEDO, I. M. L. DE; LÖSCHEL, A.; SINGH, A. K.; STEG, L.; STRBAC, G.; WADA, K. Energy Systems. In: SHUKLA, P. R. *et al.* (Org.). . *Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change*. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2022. p. 613–746. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781009157926%23c6/type/book_part>.

CNI. *Perfil da indústria: Santa Catarina*. Disponível em: <<https://perfileindustria.portaldaindustria.com.br/>>. Acesso em: 25 abr. 2023.

CNI - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. *Mercado de carbono: análise de experiências internacionais*. Brasília: CNI, 2021.

COELHO, S. T.; GOLDEMBERG, J.; LUCON, O.; GUARDABASSI, P. Brazilian sugarcane ethanol: lessons learned. *Energy for Sustainable Development*, v. 10, n. 2, p. 26–39, jun. 2006. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60529-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60529-3)>.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. *Tabela de dados - Produção de cana-de-açúcar e subprodutos*. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>>. Acesso em: 7 jul. 2023.

CORMOS, C. C. Integrated assessment of IGCC power generation technology with carbon capture and storage (CCS). *Energy*, v. 42, n. 1, p. 434–445, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.03.025>>.

COSTA, B. M. DA; FRIGHETTO, S.; PIRES, M.; FERRO, C.; AQUINO, T. F. DE; ESTEVAM, S. T.; MELO, C. R.; MELO, A. R.; MARCELLO, R. R.; NASCIMENTO, C. Influence of pretreatment of Brazilian coal ash on the hydrothermal synthesis of zeolites. 2016, Rio de Janeiro: 18th International Zeolite Conference, 2016. p. 5–6.

COSTA, I.; ROCHEDO, P.; COSTA, D.; FERREIRA, P.; ARAÚJO, M.; SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. Placing hubs in CO₂ pipelines: An application to industrial CO₂ emissions in the Iberian Peninsula. *Applied Energy*, v. 236, n. June 2018, p. 22–31, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.050>>.

COSTA, I. *Proposta de Estrutura Regulatória para Sequestro Geológico de CO₂ no Brasil e uma Aplicação para o Estado do Rio de Janeiro*. 2014. 167 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

CREMONEZ, P. A.; FEROLDI, M.; DE ARAÚJO, A. V.; NEGREIROS BORGES, M.; WEISER MEIER, T.; FEIDEN, A.; GUSTAVO TELEKEN, J. Biofuels in Brazilian aviation: Current scenario and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 43, p. 1063–1072, 2014.

DA SILVA, F. T. F. *Avaliação da torrefação e densificação de resíduos agrícolas no Brasil*. 2017. 198 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

DA SILVA, F. T. F.; CARVALHO, F. M.; CORRÊA, J. L. G.; MERSCHMANN, P. R. DE C.; TAGOMORI, I. S.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. CO₂ capture in ethanol distilleries in Brazil: Designing the optimum carbon transportation network by integrating hubs, pipelines and trucks. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 71, n. May 2017, p. 168–183, 1 abr. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1750583617304371?via%3Dihub>>. Acesso em: 13 dez. 2018.

DA SILVA, F. T. F.; SZKLO, A.; VINHOZA, A.; NOGUEIRA, A. C.; LUCENA, A. F. P.; MENDONÇA, A. M.; MARCOLINO, C.; NUNES, F.; CARVALHO, F. M.; TAGOMORI, I.; SOARES, L.; DA CRUZ, M. R.; ROCHEDO, P.; RAJÃO, R.; RATHMANN, R.; SCHAEFFER, R.; DE BITTENCOURT, S. R. M. Inter-sectoral

prioritization of climate technologies: insights from a Technology Needs Assessment for mitigation in Brazil. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, v. 27, n. 7, p. 48, 1 out. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11027-022-10025-6>>.

DAFNOMILIS, I.; DEN ELZEN, M.; VAN VUUREN, D. P. Achieving net-zero emissions targets: An analysis of long-term scenarios using an integrated assessment model. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 1522, n. 1, p. 98–108, 2023.

DAVIS, D. L.; BELL, M. L.; FLETCHER, T. A look back at the London smog of 1952 and the half century since. *Environmental Health Perspectives*, v. 110, n. 12, p. 734–735, 2002.

DE C. MERSCHMANN, P. R.; SZKLO, A. S.; SCHAEFFER, R. Technical potential and abatement costs associated with the use of process emissions from sugarcane ethanol distilleries for EOR in offshore fields in Brazil. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 52, p. 270–292, set. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.07.007>>.

DE CONINCK, H.; PUIG, D. Assessing climate change mitigation technology interventions by international institutions. *Climatic Change*, v. 131, n. 3, p. 417–433, 2015.

DE OLIVEIRA, C. C. N.; ZOTIN, M. Z.; ROCHEDO, P. R. R.; SZKLO, A. Achieving negative emissions in plastics life cycles through the conversion of biomass feedstock. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 15, n. 2, p. 430–453, 2021.

DE OLIVEIRA, C. C. N.; ROCHEDO, P. R. R.; BHARDWAJ, R.; WORRELL, E.; SZKLO, A. Bio-ethylene from sugarcane as a competitiveness strategy for the Brazilian chemical industry. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 14, n. 2, p. 286–300, 2020.

DE OLIVEIRA, C. C. N.; ANGELKORTE, G.; ROCHEDO, P. R. R.; SZKLO, A. The role of biomaterials for the energy transition from the lens of a national integrated assessment model. *Climatic Change*, v. 167, n. 3–4, 2021.

DELEVINGE, L.; GLAZENER, W.; GREGOIR, L.; HENDERSON, K. *Climate risk and decarbonization: What every mining CEO needs to know*. McKinsey and Company, Metals & Mining and Sustainability Practices. New Jersey, NY: [s.n.], 2020. Disponível em: <[https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Business Functions/Sustainability/Our Insights/Climate risk and decarbonization What every](https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Business%20Functions/Sustainability/Our%20Insights/Climate%20risk%20and%20decarbonization%20What%20every)

mining CEO needs to know/Climate-risk-and-decarbonization-What-every-mining-CEO-needs-to-know.ashx>.

DENG, H. M.; LIANG, Q. M.; LIU, L. J.; ANADON, L. D. Co-benefits of greenhouse gas mitigation: A review and classification by type, mitigation sector, and geography. *Environmental Research Letters*, v. 12, n. 12, 2017.

DEPOI, F. S.; POZEBON, D.; KALKREUTH, W. D. Chemical characterization of feed coals and combustion-by-products from Brazilian power plants. *International Journal of Coal Geology*, v. 76, n. 3, p. 227–236, 2008.

DER SPIEGEL. Säureregen: »Da liegt was in der Luft«. *Der Spiegel*, nov. 1981. Disponível em: <<https://www.spiegel.de/politik/saeureregen-da-liegt-was-in-der-luft-a-9b3bc698-0002-0001-0000-000014347006?context=issue>>.

DIATOM. *Zeólito*. Disponível em: <<http://www.diatom.com.br/pt-BR/produtos/zeolito>>. Acesso em: 5 mar. 2023.

DIEESE - DEPARTAMENTO INTERSINDICAL DE ESTATÍSTICA E ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS. *Carvão mineral - Experiências internacionais na busca por uma transição energética justa para o setor carbonífero no sul do Brasil*. . São Paulo: [s.n.], 2021.

DIEESE - DEPARTAMENTO INTERSINDICAL DE ESTATÍSTICA E ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS. *Os trabalhadores em extração e beneficiamento de carvão mineral em Santa Catarina e Rio Grande do Sul Os trabalhadores em extração e beneficiamento de carvão mineral em Santa Catarina e Rio Grande do Sul*. . São Paulo: [s.n.], 2022.

DINO, R.; GALLO, Y. LE. CCS project in Recôncavo Basin. *Energy Procedia*, v. 1, n. 1, p. 2005–2011, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.261>>.

DOS SANTOS, G. C.; BLEYER, G. C.; MARTINS, L. S.; PADOIN, N.; WATZKO, E. S.; DE AQUINO, T. F.; VASCONCELOS, L. B. CO₂ adsorption in a zeolite-based bench scale moving bed prototype: Experimental and theoretical investigation. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 171, p. 225–236, 2021.

DUTRA, R. M. *Propostas de Políticas Específicas para Energia Eólica no Brasil após*

a Primeira Fase do PROINFA. 2007. 436 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

DUTRA, R. M.; SZKLO, A. S. Incentive policies for promoting wind power production in Brazil: Scenarios for the Alternative Energy Sources Incentive Program (PROINFA) under the New Brazilian electric power sector regulation. *Renewable Energy*, v. 33, n. 1, p. 65–76, 2008.

EBADIAN, M.; SOWLATI, T.; SOKHANSANJ, S.; STUMBORG, M.; TOWNLEY-SMITH, L. A new simulation model for multi-agricultural biomass logistics system in bioenergy production. *Biosystems Engineering*, v. 110, n. 3, p. 280–290, 2011.

Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.08.008>>.

ENERGY INSTITUTE. *Statistical Review of World Energy*. 72. ed. London: S&P Global Platts, 2023.

ENGIE. *ENGIE conclui venda do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda para a FRAM capital*. Disponível em: <<https://www.engie.com.br/imprensa/press-release/engie-conclui-venda-do-complexo-termeletrico-jorge-lacerda-para-a-fram-capital/>>. Acesso em: 24 out. 2023.

EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Nitrogen oxides (NO_x), why and how they are controlled*. Technical bulletin, Technical bulletin., nº 456/F-99–006R. Research Triangle Park: [s.n.], 1999.

EPE. *Balanço Energético Nacional 2021 - Relatório Síntese*. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-588/Relatório Síntese BEN 2021-ab 2020_v2.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-588/Relatório%20Síntese%20BEN%2021-ab%202020_v2.pdf)>.

EPE. *Balanço Energético Nacional Relatório Síntese 2023. Relatório de síntese*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2023.

EPE. *Energia Termelétrica: Gás natural, Biomassa, Carvão, Nuclear*. 1. ed. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

EPE. *Leilões de Energia Nova A-5 e A-6 2022*. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/leiloes-de-energia/Paginas/Leiloes-de-Energia-Nova-A-5-e-A-6-2022-.aspx>>. Acesso em: 28 mar. 2023a.

- EPE. *Parâmetros de Custos – Geração e Transmissão*. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/topico-522/Caderno de Parâmetros de Custos - PDE 2030.pdf>>. Acesso em: 28 mar. 2023b.
- EPE. *PIG - Plano Indicativo de Gasodutos de Transporte - DEZEMBRO DE 2022*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2022b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-710/PIG 2022_REV1.pdf>.
- EPE. *Plano Nacional de Energia - PNE 2050. Plano Nacional de Energia - PNE 2050*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2020.
- ESTEVAM, S. T.; DE AQUINO, T. F.; SILVA, T. D.; DA CRUZ, R.; BONETTI, B.; RIELLA, H. G.; SOARES, C. Synthesis of K-Merlinoite zeolite from coal fly ash for fertilizer application. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 39, n. 3, p. 631–643, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s43153-021-00172-9>>.
- FÁBRICA CARIOCA DE CATALISADORES. *FCC S.A. completa 21 anos*. Disponível em: <http://www.fccsa.com.br/templates/fccsa/noticia/noticia.asp?cod_Canal=1&cod_noticia=18&cod_idioma=0>. Acesso em: 5 mar. 2023.
- FÁBRICA CARIOCA DE CATALISADORES. *Quem somos*. Disponível em: <https://www.fccsa.com.br/publicacao/?dc=1&cod_canal=27&cod_pai=290&cod_publicacao=290&cod_grupo=0&cod_idioma=0>. Acesso em: 5 mar. 2023.
- FAO. *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture 2021 – Systems at breaking point*. Rome: FAO, 2022. Disponível em: <<http://www.fao.org/documents/card/en/c/cb9910en>>.
- FARIAS, E. J. DE. *Análise da viabilidade da redução dos impactos ambientais na mineração do carvão mineral por meio da aplicação do backfill*. 2019. 71 f. Universidade do Sul de Santa Catarina, 2019.
- FEDSON, N. *The Importance of COP26*. Disponível em: <<https://alfaenergygroup.com/uk/2019/08/the-importance-of-cop26/>>. Acesso em: 17 out. 2023.

FELLET, G.; MARCHIOL, L.; DELLE VEDOVE, G.; PERESSOTTI, A. Application of biochar on mine tailings: Effects and perspectives for land reclamation.

Chemosphere, v. 83, n. 9, p. 1262–1267, 2011. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.03.053>>.

FERON, P. H. M.; COUSINS, A.; JIANG, K.; ZHAI, R.; GARCIA, M. An update of the benchmark post-combustion CO₂-capture technology. *Fuel*, v. 273, n. May 2019, p. 117776, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117776>>.

FERROUKHI, R.; NAGPAL, D.; LOPEZ-PENA, A.; HODGES, T.; MOHTAR, R. H.; DAHER, B.; MOHTAR, S. Renewable energy in the water, energy and food nexus. *International Renewable Energy Agency*, n. January, p. 1–125, 2015.

FESTIN, E. S.; TIGABU, M.; CHILESHE, M. N.; SYAMPUNGANI, S.; ODÉN, P. C. Progresses in restoration of post-mining landscape in Africa. *Journal of Forestry Research*, n. March, p. 1–16, 2018.

FLANIGEN, E. M. Zeolites and molecular sieves: an historical perspective. In: VAN BEKKUM, H.; FLANIGEN, E. M.; JANSEN, J. C. (Org.). *Introduction to zeolite Science and Practice*. Amsterdam: Elsevier, 1991. p. 13–34.

FOUQUET, R.; PEARSON, P. J. G. Past and prospective energy transitions: Insights from history. *Energy Policy*, v. 50, p. 1–7, 2012.

FRANGETTO, F. W.; VEIGA, A. P. B.; LUEDEMANN, G. *Legado do MDL*. 1. ed. Brasília: IPEA, 2018.

FS. *Agenda do Carbono*. Disponível em: <<https://www.fs.agr.br/nosso-negocio/carbono/>>. Acesso em: 6 jul. 2023.

FUNGARO, D. A.; IZIDORO, J. DE C. REMEDIAÇÃO DE DRENAGEM ÁCIDA DE MINA USANDO ZEÓLITAS SINTETIZADAS A PARTIR DE CINZAS LEVES DE CARVÃO. *Química Nova*, v. 29, n. 4, p. 735–740, 2006.

FUSS, S.; CANADELL, J. G.; PETERS, G. P.; TAVONI, M.; ANDREW, R. M.; CIAIS, P.; JACKSON, R. B.; JONES, C. D.; KRAXNER, F.; NAKICENOVIC, N.; LE QUÉRÉ, C.; RAUPACH, M. R.; SHARIFI, A.; SMITH, P.; YAMAGATA, Y. Betting on negative emissions. *Nature Climate Change*, v. 4, n. 10, p. 850–853, 21 out. 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2392>>.

FUSS, S.; LAMB, W. F.; CALLAGHAN, M. W.; HILAIRE, J.; CREUTZIG, F.; AMANN, T.; BERINGER, T.; DE OLIVEIRA GARCIA, W.; HARTMANN, J.; KHANNA, T.; LUDERER, G.; NEMET, G. F.; ROGELJ, J.; SMITH, P.; VICENTE, J. L. V.; WILCOX, J.; DEL MAR ZAMORA DOMINGUEZ, M.; MINX, J. C. Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters*, v. 13, n. 6, p. 063002, 1 jun. 2018. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/1748-9326/13/i=6/a=063002?key=crossref.280beee8a19ff00042252ae3ce163a06>>.

GALGOCZI, B. Phasing out Coal – A Just Transition Approach. *SSRN Electronic Journal*, 2019.

GALGÓCZI, B. The long and winding road from black to green. *International Journal of Labour Research*, v. 6, n. 2, p. 217–241, 2014. Disponível em: <https://eu01.alma.exlibrisgroup.com/view/action/uresolver.do?operation=resolveService&package_service_id=22314964510002466&institutionId=2466&customerId=2465>

GAMBHIR, A.; BUTNAR, I.; LI, P. H.; SMITH, P.; STRACHAN, N. A review of criticisms of integrated assessment models and proposed approaches to address these, through the lens of BECCs. *Energies*, v. 12, n. 9, p. 1–21, 2019.

GAMBHIR, A.; GREEN, F.; PEARSON, P. J. G. *Towards a just and equitable low-carbon energy transition. Grantham Institute Briefing Paper*, Briefing paper., nº 26. London: [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/grantham-institute/public/publications/briefing-papers/26.-Towards-a-just-and-equitable-low-carbon-energy-transition.pdf>>.

GEELS, F. W. Disruption and low-carbon system transformation: Progress and new challenges in socio-technical transitions research and the Multi-Level Perspective. *Energy Research and Social Science*, v. 37, n. September 2017, p. 224–231, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.10.010>>.

GEELS, F. W. Ontologies, socio-technical transitions (to sustainability), and the multi-level perspective. *Research Policy*, v. 39, n. 4, p. 495–510, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.respol.2010.01.022>>.

GEELS, F. W. Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. *Research Policy*, v. 31, n. 8, p. 1257–1274,

2002. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048733302000628>>.

GEELS, F. W.; KERN, F.; FUCHS, G.; HINDERER, N.; KUNGL, G.; MYLAN, J.; NEUKIRCH, M.; WASSERMANN, S. The enactment of socio-technical transition pathways: A reformulated typology and a comparative multi-level analysis of the German and UK low-carbon electricity transitions (1990-2014). *Research Policy*, v. 45, n. 4, p. 896–913, 2016. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.respol.2016.01.015>>.

GEELS, F. W. The multi-level perspective on sustainability transitions: Responses to seven criticisms. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, v. 1, n. 1, p. 24–40, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.eist.2011.02.002>>.

GEELS, F. W.; SCHOT, J. Typology of sociotechnical transition pathways. *Research Policy*, v. 36, n. 3, p. 399–417, 2007.

GEŚIKIEWICZ-PUCHALSKA, A.; ZGRZEBNICKI, M.; MICHALKIEWICZ, B.; KAŁAMAGA, A.; NARKIEWICZ, U.; MORAWSKI, A. W.; WROBEL, R. Changes in porous parameters of the ion exchanged x zeolite and their effect on co2 adsorption. *Molecules*, v. 26, n. 24, 2021.

GLOBAL CCS INSTITUTE. *CCS Facilities Database*. Disponível em:

<<https://co2re.co/FacilityData>>. Acesso em: 6 jul. 2023.

GLOBAL CCS INSTITUTE. *Global Status of CCS 2019*. . Melbourne: Global Carbon Capture and Storage Institute Ltd. Disponível em:

<http://www.springerreference.com/index/doi/10.1007/SpringerReference_15392>. , 2019

GLOBAL FOOTPRINT NETWORK. *Earth Overshoot Day*. Disponível em:

<https://www.overshootday.org/content/uploads/2022/06/2022_Past_EOD_en.pdf>.

Acesso em: 21 out. 2023.

GLOBAL INFORMATION. *Zeolite*. Disponível em:

<<https://www.giiresearch.com/report/go958889-zeolite.html>>. Acesso em: 2 mar. 2023.

GOLDAR, A.; SHARMA, S.; SAWANT, V.; JAIN, S. *Climate Change & Technology Transfer – Barriers , Technologies and Mechanisms*. New Delhi, India: Indian Council

for Research on International Economic Relations, 2019. Disponível em:

<https://icrier.org/pdf/Working_Paper_382.pdf>.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T.; NASTARI, P. M.; LUCON, O. Ethanol learning curve - The Brazilian experience. *Biomass and Bioenergy*, v. 26, n. 3, p. 301–304, 2004.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T.; GUARDABASSI, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. *Energy Policy*, v. 36, n. 6, p. 2086–2097, 2008.

GOLDEMBERG, J.; TEIXEIRA COELHO, S. Renewable energy - Traditional biomass vs. modern biomass. *Energy Policy*, v. 32, n. 6, p. 711–714, 2004.

GONZÁLEZ, M. F.; ILYINA, T. Impacts of artificial ocean alkalization on the carbon cycle and climate in Earth system simulations. *Geophysical Research Letters*, v. 43, n. 12, p. 6493–6502, 2016.

GOVERNO DE SANTA CATARINA. *LEI Nº 18.330, DE 5 de janeiro de 2022*. .

Florianópolis: Governo do Estado de Santa Catarina, Assembleia Legislativa de Santa Catarina. Disponível em: <http://leis.ale.sc.gov.br/html/2022/18330_2022_lei.html>. , 2022

GRAND VIEW RESEARCH. *Zeolite Market Size, Share & Trends Analysis Report By Application (Catalyst, Adsorbent, Detergent Builder), By Product (Natural, Synthetic), By Region (North America, Europe, APAC, CSA, MEA), And Segment Forecasts, 2022 - 2030*. Disponível em: <<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/zeolites-market>>. Acesso em: 2 mar. 2023.

GREEN, D. W.; PERRY, R. H. *Perry's Chemical Engineers' Handbook, Eighth Edition*. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2007. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=tH7IVcA-MX0C>>. (McGraw Hill professional).

GREEN, F.; GAMBHIR, A. Transitional assistance policies for just, equitable and smooth low-carbon transitions: who, what and how? *Climate Policy*, v. 20, n. 8, p. 902–921, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/14693062.2019.1657379>>.

GREGORY, P. J.; INGRAM, J. S. I.; BRKLACICH, M. Climate change and food security. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 360, n. 1463, p. 2139–2148, 2005.

GREINER, P. T.; YORK, R.; MCGEE, J. A. Snakes in The Greenhouse: Does increased natural gas use reduce carbon dioxide emissions from coal consumption? *Energy Research and Social Science*, v. 38, n. January, p. 53–57, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.02.001>>.

GRUBLER, A.; JOHANSSON, T. B.; MUNDACA, L.; NAKICENOVIC, N.; PACHAURI, S.; RIAHI, K.; ROGNER, H.-H.; STRUPEIT, L. Chapter 1 - Energy Primer. *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*. 1. ed. Laxenburg: University Press; International Institute for Applied Systems Analysis, 2012. p. 99–150. Disponível em: <http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/Flagship-Projects/Global-Energy-Assessment/GEA_Chapter1_primer_hires.pdf>.

GRUBLER, A. Energy transitions research: Insights and cautionary tales. *Energy Policy*, v. 50, p. 8–16, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.02.070>>.

GTA. *Primeiro relatório de monitoramento dos indicadores ambientais*. . Criciúma: [s.n.], 2007. Disponível em: <http://www.siecesc.com.br/meio_ambiente/arquivos-GTA>.

GUZOVIĆ, Z.; DUIĆ, N.; PIACENTINO, A.; MARKOVSKA, N.; MATHIESEN, B. V.; LUND, H. Paving the way for the Paris Agreement: Contributions of SDEWES science. *Energy*, v. 263, n. October 2022, 2023.

HANSEN, U. E.; NYGAARD, I.; ROMIJN, H.; WIECZOREK, A.; KAMP, L. M.; KLERKX, L. Sustainability transitions in developing countries: Stocktaking, new contributions and a research agenda. *Environmental Science and Policy*, v. 84, n. December 2017, p. 198–203, 2018.

HARARI, Y. N. *Sapiens - Uma breve história da humanidade*. 24. ed. Porto Alegre: L&PM, 2017.

HASELIP, J.; NARKEVICIUTE, R.; ROGAT, J.; TRÆRUP, S. *TNA Step by Step: a guidebook for countries conducting a Technology Needs Assessment and Action Plan*. 2. ed. Copenhagen, Denmark: UNEP DTU Partnership, 2019.

HEEMANN, R.; COSTA, J. C. F. Emprego da tecnologia de backfilling na gestão de resíduos sólidos da mineração de carvão. In: SOARES, P. S. M.; SANTOS, M. D. C. DOS; POSSA, M. V. (Org.). . *Carvão Brasileiro: Tecnologia e Meio Ambiente*. 1. ed.

Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. p. 57–74.

HIRSH, R. F.; JONES, C. F. History's contributions to energy research and policy. *Energy Research and Social Science*, v. 1, p. 106–111, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.erss.2014.02.010>>.

HOFFMANN, B. S. *O ciclo combinado com gaseificação integrada e a captura de CO₂: Uma solução para mitigar as emissões de CO₂ em termelétricas a carvão em larga escala no curto prazo?* 2010. 128 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

HOFFMANN, B. S. *O Potencial Termelétrico a Carvão No Rio Grande Do Sul Diante Restrições De Disponibilidade De Água E Objetivos De Redução De Emissões De Co₂, Aplicando a Queima Em Leito Fluidizado.* 2013. 208 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

HOFFMANN, B. S.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. An evaluation of the techno-economic potential of co-firing coal with woody biomass in thermal power plants in the south of Brazil. *Biomass and Bioenergy*, v. 45, p. 295–302, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.06.016>>.

HOFFMANN, B. S.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. Limits to co-combustion of coal and eucalyptus due to water availability in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. *Energy Conversion and Management*, v. 87, p. 1239–1247, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.01.062>>.

HOFMAN, E.; VAN DER GAAST, W. Enhancing ambition levels in nationally determined contributions—Learning from Technology Needs Assessments. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, v. 8, n. 1, p. 1–15, 2019.

HÖHNE, N.; DEN ELZEN, M.; ROGELJ, J.; METZ, B.; FRANSEN, T.; KURAMOCHI, T.; OLHOFF, A.; ALCAMO, J.; WINKLER, H.; FU, S.; SCHAEFFER, M.; SCHAEFFER, R.; PETERS, G. P.; MAXWELL, S.; DUBASH, N. K. Emissions: world has four times the work or one-third of the time. *Nature*, v. 579, n. 7797, p. 25–28, 5 mar. 2020. Disponível em: <<http://www.nature.com/articles/nature18307>>.

HONG, J. L. X.; MANEERUNG, T.; KOH, S. N.; KAWI, S.; WANG, C. H. Conversion of Coal Fly Ash into Zeolite Materials: Synthesis and Characterizations,

Process Design, and Its Cost-Benefit Analysis. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 56, n. 40, p. 11565–11574, 2017.

HONG, W. Y. A techno-economic review on carbon capture, utilisation and storage systems for achieving a net-zero CO₂ emissions future. *Carbon Capture Science and Technology*, v. 3, n. December 2021, p. 100044, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ccst.2022.100044>>.

HOOK, Leslie; HODGSON, Camilla; PICKARD, Jim. India and China weaken pledge to phase out coal as COP26 ends. *Financial Times*, Glasgow, 2021. , p. 9–12 Disponível em: <<https://www.ft.com/content/471c7db9-925f-479e-ad57-09162310a21a>>.

HORNSEY, M. J.; FIELDING, K. S. Understanding (and Reducing) Inaction on Climate Change. *Social Issues and Policy Review*, v. 14, n. 1, p. 3–35, 2020.

HORTA NOGUEIRA, L. A.; MOREIRA, J. R.; SCHUCHARDT, U.; GOLDEMBERG, J. The rationality of biofuels. *Energy Policy*, v. 61, p. 595–598, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.112>>.

IACGB - INTERNATIONAL ADVISORY COUNCIL ON GLOBAL BIOECONOMY. *Global Bioeconomy Policy Report (IV): A decade of bioeconomy policy development around the world*. . Berlin: [s.n.], 2020. Disponível em: <https://gbs2020.net/wp-content/uploads/2021/04/GBS-2020_Global-Bioeconomy-Policy-Report_IV_web-2.pdf>.

IEA. *Energy Technology Perspectives 2020*. Paris: OECD, 2020. Disponível em: <https://www.oecd-ilibrary.org/energy/energy-technology-perspectives-2020_ab43a9a5-en>.

IEA. *Global EV Outlook 2019: Scaling-up the transition to electric mobility*. . IEA/International Energy Agency. 2019.: [s.n.], 2019.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *CO₂ Capture and Utilisation*. Disponível em: <<https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/co2-capture-and-utilisation>>. Acesso em: 16 out. 2023a.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Direct Air Capture*. Disponível em: <<https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/direct-air-capture>>. Acesso em: 20 out. 2023b.

IECM. *Integrated Environmental Control Model (IECM) Version 11.5 (Carnegie Mellon University)*. Disponível em: <<https://www.cmu.edu/epp/iecm/index.html>>.

IEMA. *Inventário de Emissões Atmosféricas em Usinas Termelétricas: geração de eletricidade, emissões e lista de empresas proprietárias das termelétricas a combustíveis fósseis e de serviço público do Sistema Interligado Nacional (ano-base 2020)*. . São Paulo: [s.n.], 2022.

ILO - INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION. *Guidelines for a just transition towards environmentally sustainable economies and societies for all*. 1. ed. Geneva: ILO Publications, 2015. Disponível em: <www.ilo.org/publns>.

ILO - INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION. *Social Dialogue Report - Executive summary*. , ILO Flagship Reports. Geneva: [s.n.], 2022.

ILYINA, T.; WOLF-GLADROW, D.; MUNHOVEN, G.; HEINZE, C. Assessing the potential of calcium-based artificial ocean alkalization to mitigate rising atmospheric CO₂ and ocean acidification. *Geophysical Research Letters*, v. 40, n. 22, p. 5909–5914, 2013.

IMPÉRIO, M. M. T. DA S. *Nexo entre poluição atmosférica de impacto local mudanças climáticas globais em um modelo de avaliação integrada para o Brasil*. 2020. 206 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2020.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: <<https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781009157896/type/book>>.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022a. Disponível em: <<https://www.un-ilibrary.org/content/books/9789210012973c007>>.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change*. . Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Summary for Policymakers. *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2022b. v. 9781107025. p. 3–34. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781009325844%23pre2/type/book_part>.

IRENA; ILO. *Renewable Energy & Jobs: Annual Review 2022*. Abu Dhabi: [s.n.], 2022.

ISHIBASHI, M.; OTA, H.; AKUTSU, N.; UMEDA, S.; TAJIKA, M.; IZUMI, J.; YASUTAKE, A.; KABATA, T.; KAGEYAMA, Y. Technology for removing carbon dioxide from power plant flue gas by the physical adsorption method. *Energy Conversion and Management*, v. 37, n. 6–8, p. 929–933, jun. 1996. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0196890495002790>>.

JARRAUD, M.; STEINER, A. *Summary for policymakers*. [S.l.: s.n.], 2012. v. 9781107025.

JENKINS, J.; MANSUR, S. *Bridging the Clean Energy Valleys of Death*. Disponível em: <https://s3.us-east-2.amazonaws.com/uploads.thebreakthrough.org/legacy/blog/Valleys_of_Death.pdf>.

JIANG, K.; FERON, P.; COUSINS, A.; ZHAI, R.; LI, K. Achieving Zero/Negative-Emissions Coal-Fired Power Plants Using Amine-Based Postcombustion CO₂ Capture Technology and Biomass Cocombustion. *Environmental Science and Technology*, v. 54, n. 4, p. 2429–2438, 2020.

JOHN, V. M.; DAMINELI, B. L.; QUATTRONE, M.; PILEGGI, R. G. Fillers in cementitious materials — Experience, recent advances and future potential. *Cement and Concrete Research*, v. 114, n. December 2016, p. 65–78, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.09.013>>.

JOSS, L.; GAZZANI, M.; MAZZOTTI, M. Rational design of temperature swing adsorption cycles for post-combustion CO₂ capture. *Chemical Engineering Science*, v. 158, n. September 2016, p. 381–394, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2016.10.013>>.

KALLÓ, D.; PAPP, J.; VALYON, J. Adsorption and catalytic properties of sedimentary clinoptilolite and mordenite from the Tokaj Hills, Hungary. *Zeolites*, v. 2, n. 1, p. 13–

16, 1982.

KANGER, L.; GEELS, F. W.; SOVACOO, B.; SCHOT, J. Technological diffusion as a process of societal embedding: Lessons from historical automobile transitions for future electric mobility. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 71, n. December 2018, p. 47–66, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.11.012>>.

KEARNS, D.; LIU, H.; CONSOLI, C. *Technology Readiness and Costs of CCS - Global CCS Institute. Global CCS Institute*. Melbourne: [s.n.], 2021. Disponível em: <<https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/03/Technology-Readiness-and-Costs-for-CCS-2021-1.pdf>>.

KELLER, D. P.; LENTON, A.; LITTLETON, E. W.; OSCHLIES, A.; SCOTT, V.; VAUGHAN, N. E. The Effects of Carbon Dioxide Removal on the Carbon Cycle. *Current Climate Change Reports*, v. 4, n. 3, p. 250–265, 2018.

KIM, M. S.; MIN, H. G.; KOO, N.; PARK, J.; LEE, S. H.; BAK, G. I.; KIM, J. G. The effectiveness of spent coffee grounds and its biochar on the amelioration of heavy metals-contaminated water and soil using chemical and biological assessments. *Journal of Environmental Management*, v. 146, p. 124–130, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.001>>.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 127, n. September, p. 221–232, 2017.

KNAEBEL, K. S. *Temperature swing adsorption system*. . United States of America: [s.n.], 2013

KÖBERLE, A. C.; ROCHEDO, P. R. R.; LUCENA, A. F. P.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. Brazil's emission trajectories in a well-below 2 °C world: the role of disruptive technologies versus land-based mitigation in an already low-emission energy system. *Climatic Change*, v. 162, n. 4, p. 1823–1842, 2020.

KÖBERLE, A. C. The Value of BECCS in IAMs: a Review. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, v. 6, n. 4, p. 107–115, 2019.

KOEHLER, N. F. DE M.; VIRMOND, E.; AQUINO, T. F. DE. SIMULAÇÃO DA

- CAPTURA DE CO₂ POR MEIO DE PÓS-COMBUSTÃO DE CARVÃO MINERAL. 7 nov. 2017, [S.l.]: Rede de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação do Carvão Mineral, 7 nov. 2017. Disponível em: <<http://www.swge.inf.br/proceedings/paper/?P=CBCM2017-0019>>.
- KOPPE, J. C.; COSTA, J. F. C. L. A lavra de carvão e o meio ambiente em Santa Catarina. In: SOARES, P. S. M.; SANTOS, M. D. C. DOS; POSSA, M. V. (Org.). . *Carvão Brasileiro: Tecnologia e Meio Ambiente*. 1. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. p. 300.
- KOPPEJAN, J.; SOKHANSANJ, S.; MELIN, S.; MADRALI, S. Status overview of torrefaction technologies. *IEA Bioenergy Task 32*, n. December, p. 1–54, 2012.
- KRISHNAN, M.; SAMANDARI, H.; WOETZEL, J.; SMIT, S.; PACTHOD, D.; PINNER, D.; NAUCLÉR, T.; TAI, H.; FARR, A.; WU, W.; IMPERATO, D. The net-zero transition. *McKinsey & Company*, n. January, p. 1–64, 2022.
- LAIRD, F. N. Against Transitions? Uncovering Conflicts in Changing Energy Systems. *Science as Culture*, v. 22, n. 2, p. 149–156, 2013.
- LATAWIEC, A. E.; STRASSBURG, B. B. N.; JUNQUEIRA, A. B.; ARAUJO, E.; LUIZ, L. F.; PINTO, H. A. N.; CASTRO, A.; RANGEL, M.; MALAGUTI, G. A.; RODRIGUES, A. F.; BARIONI, L. G.; NOVOTNY, E. H.; CORNELISSEN, G.; MENDES, M.; BATISTA, N.; GUERRA, J. G.; ZONTA, E.; JAKOVAC, C.; HALE, S. E. Biochar amendment improves degraded pasturelands in Brazil: environmental and cost-benefit analysis. *Scientific Reports*, v. 9, n. 1, p. 1–12, 2019.
- LECOCQ, F.; WINKLER, H.; DAKA, J. P.; FU, S.; GERBER, J.; KARTHA, S.; KREY, V.; LOFGREN, H.; MASUI, T.; MATHUR, R.; PORTUGAL-PEREIRA, J.; SOVACOOOL, B. K.; VILARIÑO, M. V.; ZHOU, N.; ELZEN, M. DEN; DLAMINI, R.; HEALY, N.; HÖHNE, N.; HSU, A.; KHANNA, N.; LEPAULT, C.; RUNGE, F.; SEBOTHOMA, D. Chapter 4: Mitigation and development pathways in the near- to mid-term. In: GALEOTTI, M. D.; PEDACE, A. (Org.). . *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022. p. 156.
- LEHMANN, J.; JOSEPH, S. *Biochar for Environmental Management*. 1. ed. London: Earthscan, 2009. Disponível em: <<http://www.tandfebooks.com/isbn/9781849770552>>.

- LENTON, A.; MATEAR, R. J.; KELLER, D. P.; SCOTT, V.; VAUGHAN, N. E. Assessing carbon dioxide removal through global and regional ocean alkalization under high and low emission pathways. *Earth System Dynamics*, v. 9, n. 2, p. 339–357, 2018.
- LEUNG, D. Y. C.; CARAMANNA, G.; MAROTO-VALER, M. M. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 39, p. 426–443, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.093>>.
- LEVINE, D. G.; SCHLOSBERG, R. H.; SILBERNAGEL, B. G. Understanding the chemistry and physics of coal structure (A Review). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 79, n. 10, p. 3365–3370, 1982.
- LI, B.; DUAN, Y.; LUEBKE, D.; MORREALE, B. Advances in CO₂ capture technology: A patent review. *Applied Energy*, v. 102, p. 1439–1447, fev. 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.09.009>>.
- LI, G.; XIAO, P.; WEBLEY, P. A.; ZHANG, J.; SINGH, R. Competition of CO₂/H₂O in adsorption based CO₂ capture. *Energy Procedia*, v. 1, n. 1, p. 1123–1130, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.148>>.
- LIU, L.; SINGH, R.; XIAO, P.; WEBLEY, P. A.; ZHAI, Y. Zeolite synthesis from waste fly ash and its application in CO₂ capture from flue gas streams. *Adsorption*, v. 17, n. 5, p. 795–800, 2011.
- LIU, R. S.; SHI, X. D.; WANG, C. T.; GAO, Y. Z.; XU, S.; HAO, G. P.; CHEN, S.; LU, A. H. Advances in Post-Combustion CO₂ Capture by Physical Adsorption: From Materials Innovation to Separation Practice. *ChemSusChem*, v. 14, n. 6, p. 1428–1471, 2021.
- LOGAN, W. P. D. Mortality in the London Fog Incident, 1952. *The Lancet*, v. 261, n. 6755, p. 336–338, 1953.
- LOMAX, G.; LENTON, T. M.; ADEOSUN, A.; WORKMAN, M. Investing in negative emissions. *Nature Climate Change*, v. 5, n. 6, p. 498–500, 1 jun. 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2627>>.
- LONGHURST, J. W. S.; BANTOCK, J.; HARE, S. E.; CONLAN, D. E. Changing

public interest in, and awareness of, acid deposition: Some evidence from the UK. *Water, Air, & Soil Pollution*, v. 85, n. 4, p. 2631–2636, 1995.

LUCENA, A. F. P.; HEJAZI, M.; VASQUEZ-ARROYO, E.; TURNER, S.; KÖBERLE, A. C.; DAENZER, K.; ROCHEDO, P. R. R.; KOBER, T.; CAI, Y.; BEACH, R. H.; GERNAAT, D.; VAN VUUREN, D. P.; VAN DER ZWAAN, B. Interactions between climate change mitigation and adaptation: The case of hydropower in Brazil. *Energy*, v. 164, p. 1161–1177, 2018.

LUCENA, A. F. P.; SZKLO, A. S.; SCHAEFFER, R.; DE SOUZA, R. R.; BORBA, B. S. M. C.; DA COSTA, I. V. L.; JÚNIOR, A. O. P.; DA CUNHA, S. H. F. The vulnerability of renewable energy to climate change in Brazil. *Energy Policy*, v. 37, n. 3, p. 879–889, mar. 2009. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/enpol>.

LUCENA, J. D. A. Y.; LUCENA, K. Â. A. Wind energy in Brazil: An overview and perspectives under the triple bottom line. *Clean Energy*, v. 3, n. 2, p. 69–84, 2019.

LUZ, A. B. DA. *Zeólitas: propriedades e usos industriais*. 1. ed. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 1995.

MAIA, C. M. B. DE F.; MADARI, B. E.; NOVOTNY, E. H. Advances in Biochar Research in Brazil. *Dynamic Soil, Dynamic Plant*, v. 5, n. Special Issue 1, p. 53–58, 2011.

MAIA, P. L. B. *Análise de fatores limitantes para identificação de hotspots de aplicação de captura direta de CO₂ do ar (DAC)*. 2021. 143 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2021.

MAJCHRZAK-KUCEBA, I.; NOWAK, W. A thermogravimetric study of the adsorption of CO₂ on zeolites synthesized from fly ash. out. 2005, [S.l: s.n.], out. 2005. p. 67–74. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0040603105003114>>.

MANTRIPRAGADA, H. C.; GLIER, J.; RUBIN, E. S. *IECM Technical Documentation: Solid Sorbents with Temperature Swing Adsorption for Post-Combustion CO₂ Capture*. . Pittsburgh: The Integrated Environmental Control Model Team. , 2017

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P. M. A.; NOBRE, C. A.; RIBEIRO NETO, G. G.;

MAGALHAES, A. R.; TORRES, R. R.; SAMPAIO, G.; ALEXANDRE, F.; ALVES, L. M.; CUARTAS, L. A.; DEUSDARÁ, K. R. L.; ÁLVALA, R. C. S. Assessing drought in the drylands of northeast Brazil under regional warming exceeding 4 °C. *Natural Hazards*, v. 103, n. 2, p. 2589–2611, 2020.

MARGETA, K.; FARKAŠ, A. Introductory Chapter: Zeolites - From Discovery to New Applications on the Global Market. *Zeolites - New Challenges*, p. 1–10, 2020.

MARKETS AND MARKETS. *Zeolite Market By Type (Natural, Synthetic), Function (Ion-Exchange, Catalyst, Molecular Sieve), Synthetic Zeolites Application (Detergents, Absorbent, Catalysts), Natural Zeolites Application, and Region - Global Forecasts to 2026*. Disponível em: <<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/zeolites-market-76442083.html#:~:text=The global zeolites market was,biggest application for natural zeolites.>>. Acesso em: 2 mar. 2023.

MASLIN, M. A. The road from Rio to Glasgow: a short history of the climate change negotiations. *Scottish Geographical Journal*, v. 136, n. 1–4, p. 5–12, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/14702541.2020.1853873>>.

MCCOLLUM, D. L.; ECHEVERRI, L. G.; BUSCH, S.; PACHAURI, S.; PARKINSON, S.; ROGELJ, J.; KREY, V.; MINX, J. C.; NILSSON, M.; STEVANCE, A. S.; RIAHI, K. Connecting the sustainable development goals by their energy inter-linkages. *Environmental Research Letters*, v. 13, n. 3, 2018.

MCCUSKER, L. B.; OLSON, D. H.; BAERLOCHER, C. *Atlas of Zeolite Framework Types*. 6. ed. Amsterdam: Elsevier, 2007. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780444530646X5186X>>.

MCGLADE, C.; EKINS, P. The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2°C. *Nature*, v. 517, n. 7533, p. 187–190, 2015.

MCTIC. Opções transversais para mitigação de emissões de gases de efeito estufa redes inteligentes. *Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicação*, p. 140, 2017.

MELO, C. R. *Síntese de zeólita tipo 4A a partir de resíduo proveniente de papel branco*. 2013. 123 f. Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

MERCEDES MAROTO-VALER, M.; LU, Z.; ZHANG, Y.; TANG, Z. Sorbents for

CO₂ capture from high carbon fly ashes. *Waste Management*, v. 28, n. 11, p. 2320–2328, nov. 2008. Disponível em:

<<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X0700387X>>.

MERSCHMANN, P. R. D. C.; VASQUEZ, E.; SZKLO, A. S.; SCHAEFFER, R. Modeling water use demands for thermoelectric power plants with CCS in selected Brazilian water basins. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 13, p. 87–101, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.12.019>>.

MILANI, R.; SZKLO, A.; HOFFMANN, B. S. Hybridization of concentrated solar power with biomass gasification in Brazil's semiarid region. *Energy Conversion and Management*, v. 143, p. 522–537, 1 jul. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890417303205?via%3Dihub>>. Acesso em: 13 dez. 2018.

MINX, J. C.; LAMB, W. F.; CALLAGHAN, M. W.; FUSS, S.; HILAIRE, J.; CREUTZIG, F.; AMANN, T.; BERINGER, T.; DE OLIVEIRA GARCIA, W.; HARTMANN, J.; KHANNA, T.; LENZI, D.; LUDERER, G.; NEMET, G. F.; ROGELJ, J.; SMITH, P.; VICENTE VICENTE, J. L.; WILCOX, J.; DEL MAR ZAMORA DOMINGUEZ, M. Negative emissions—Part 1: Research landscape and synthesis. *Environmental Research Letters*, v. 13, n. 6, p. 063001, 1 jun. 2018. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/1748-9326/13/i=6/a=063001?key=crossref.9b8e1db79e5bb89326008b4b6859ede0>>.

MIRZA, N.; KEARNS, D. *State of the art: CCS technologies 2022*. . Washington, D.C.: [s.n.], 2022.

MMA - MINISTÉRIO DE MEIO AMBIENTE. *Qualidade do ar*. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar.html>>. Acesso em: 11 out. 2023.

MOLLETA, D. G. S.; CHRISTO, G. L. DE; ROCHA, M. B.; SANTOS, M. M. D. O.; GRISOLI, R. P. S.; CANTINHO, R. Z. *Estimativas de Emissões de GEE no Brasil*. . Brasília: [s.n.], 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee>>.

MONCIOSO, N. DE A. P. *Quimiometria associada à espectroscopia no infravermelho na previsão da eficiência de sequestrantes de H₂S e supressores de poeira de minério*

de ferro. 2019. 100 f. Universidade Federal do Espírito Santo, 2019.

MORALES-OSPINO, R.; GOLTZMAN, Y.; TORRES, A. E. B.; VILARRASA-GARCÍA, E.; BASTOS-NETO, M.; CAVALCANTE, C. L.; AZEVEDO, D. C. S.; MARQUES, C. R. M.; DE AQUINO, T. F.; DE OLIVEIRA, V. R. Assessment of the potential use of zeolites synthesized from power plant fly ash to capture CO₂ under post-combustion scenario. *Adsorption*, v. 26, n. 7, p. 1153–1164, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10450-020-00245-0>>.

MORALES-OSPINO, R.; SANTOS, V. N.; LIMA, A. R. A.; TORRES, A. E. B.; VILARRASA-GARCÍA, E.; BASTOS-NETO, M.; CAVALCANTE, C. L.; AZEVEDO, D. C. S.; MARQUES, C. R. M.; DE AQUINO, T. F.; VASCONCELOS, L. B.; KNAEBEL, K. S. Parametric Analysis of a Moving Bed Temperature Swing Adsorption (MBTSA) Process for Postcombustion CO₂ Capture. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 60, n. 29, p. 10736–10752, 2021.

MUKHEIBIR, P. Potential consequences of projected climate change impacts on hydroelectricity generation. *Climatic Change*, v. 121, n. 1, p. 67–78, 2013.

MÜLLER-CASSERES, E.; CUNHA, B. S. L. DA. *Pontos de não retorno: o risco oculto do aquecimento global*. Disponível em: <<https://pp.nexojornal.com.br/opiniaio/2020/Pontos-de-não-retorno-o-risco-oculto-do-aquecimento-global>>. Acesso em: 15 out. 2023.

MUMPTON, F. A. La roca magica: Uses of natural zeolites in agriculture and industry. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 96, n. 7, p. 3463–3470, 1999.

MYHRVOLD, N. P.; CALDEIRA, K. Greenhouse gases, climate change and the transition from coal to low-carbon electricity. *Environmental Research Letters*, v. 7, n. 1, 2012.

NAIK, S. N.; GOUD, V. V.; ROUT, P. K.; DALAI, A. K. Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, n. 2, p. 578–597, 2010.

NASA. *Technology Readiness Level*. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/general/technology-readiness-level/>>. Acesso em: 16 out. 2023.

NASA - NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. *What is the greenhouse effect?* Disponível em: <<https://climate.nasa.gov/faq/19/what-is-the-greenhouse-effect/>>. Acesso em: 13 out. 2023.

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES ENGINEERING AND MEDICINE. *Monitoring and Sampling Approaches to Assess Underground Coal Mine Dust Exposures*. Washington, D.C.: National Academies Press, 2018. Disponível em: <<https://www.nap.edu/catalog/25111>>.

NETO, S.; SZKLO, A.; ROCHEDO, P. R. R. Calcium looping post-combustion CO₂ capture in sugarcane bagasse fuelled power plants. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 110, n. May, 2021.

NOBRE, C. A.; SAMPAIO, G.; BORMA, L. S.; CASTILLA-RUBIO, J. C.; SILVA, J. S.; CARDOSO, M. Land-use and climate change risks in the amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 113, n. 39, p. 10759–10768, 2016.

NOGUEIRA DE OLIVEIRA, L. P.; RODRIGUEZ ROCHEDO, P. R.; PORTUGAL-PEREIRA, J.; HOFFMANN, B. S.; ARAGÃO, R.; MILANI, R.; DE LUCENA, A. F. P.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. Critical technologies for sustainable energy development in Brazil: Technological foresight based on scenario modelling. *Journal of Cleaner Production*, v. 130, p. 12–24, 2016.

NORI. *How Nori's CO₂ Removal Marketplace Works*. Disponível em: <<https://nori.com/generate-nrts>>. Acesso em: 20 out. 2023.

NOVOTNY, E. H.; MAIA, C. M. B. DE F.; CARVALHO, M. T. DE M.; MADARI, B. E. Biochar: pyrogenic carbon for agricultural use - a critical review. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 39, n. 2, p. 321–344, abr. 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832015000200321&lng=en&tlng=en>.

NREL. *Biomass Gasification Technology Assessment Consolidated Report Biomass Gasification Technology Assessment Consolidated Report*. . National Renewable Energy Laboratory. Colorado, US: [s.n.], 2012.

OCKWELL, D.; BYRNE, R. Improving technology transfer through national systems of innovation: climate relevant innovation-system builders (CRIBs). *Climate Policy*, v.

16, n. 7, p. 836–854, 2016. Disponível em:
<<https://doi.org/10.1080/14693062.2015.1052958>>.

OLIVARES-MARÍN, M.; MAROTO-VALER, M. M. Development of adsorbents for CO₂ capture from waste materials: a review. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, v. 2, n. 1, p. 20–35, fev. 2012. Disponível em:
<<http://doi.wiley.com/10.1002/ghg.45>>.

OLIVEIRA, E. A. DE. *Perspectivas da Geração Termelétrica a Carvão no Brasil no Horizonte 2010-2030*. 2009. 155 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

OLIVEIRA, L. G. S. DE. *Aproveitamento Energético De Resíduos Agrícolas – O Caso Da Agroeletricidade Distribuída*. 2011. 300 f. Programa de Planejamento Energético/COPPE/UFRJ, 2011.

ONU. *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. 2015, New York, NY: Organização das Nações Unidas, 2015.

OZAWA, M. *Determinação Experimental Da Resistividade Ôhmica De Cinzas Volantes Para Projeto De Precipitadores Eletrostáticos*. 2003. 140 f. Universidade de São Paulo, 2003. Disponível em:
<<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3132/tde-19062006-115013/publico/DissertMarceloOzawa.pdf>>.

PAGE-DUMROESE, D. S.; OTT, M. R.; STRAWN, D. G.; TIROCKE, J. M. Using Organic Amendments to Restore Soil Physical and Chemical Properties of a Mine Site in Northeastern Oregon, USA. *Applied Engineering in Agriculture*, v. 34, n. 1, p. 43–55, 2018. Disponível em: <<https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=48759>>.

PANDEY, N.; CONINCK, H.; SAGAR, A. D. Beyond technology transfer: Innovation cooperation to advance sustainable development in developing countries. *WIREs Energy and Environment*, v. 11, n. 2, p. 1–25, 18 mar. 2022. Disponível em:
<<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wene.422>>.

PAPROCKI, A. *Síntese De Zeólitas a Partir De Cinzas De Carvão Visando Sua Utilização Na Descontaminação De Drenagem Ácida De Mina*. 2009. 156 f. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2009. Disponível em:
<<https://tede2.pucrs.br/tede2/handle/tede/3133>>.

PARRA, P. A. Y.; GANTI, G.; BRECHA, R.; HARE, B.; SCHAEFFER, M.; FUENTES, U. *Coal phase-out: Insights from the IPCC Special Report on 1.5°C and global trends since 2015*. . Berlin: [s.n.], 2019. Disponível em: <<https://climateanalytics.org/publications/2019/coal-phase-out-insights-from-the-ipcc-special-report-on-15c-and-global-trends-since-2015/>>.

PATHAK, M.; SLADE, R.; SHUKLA, P. R.; SKEA, J.; PICHS-MADRUGA, R.; ÜRGE-VORSATZ, D. Technical Summary. In: SHUKLA, P. R. *et al.* (Org.). . *Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change*. Cambridge, Uk and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2022. p. 51–148. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781009157926%23c2/type/book_part>.

PATTYN, F.; RITZ, C.; HANNA, E.; ASAY-DAVIS, X.; DECONTO, R.; DURAND, G.; FAVIER, L.; FETTWEIS, X.; GOELZER, H.; GOLLEDGE, N. R.; KUIPERS MUNNEKE, P.; LENAERTS, J. T. M.; NOWICKI, S.; PAYNE, A. J.; ROBINSON, A.; SEROUSSI, H.; TRUSEL, L. D.; VAN DEN BROEKE, M. The Greenland and Antarctic ice sheets under 1.5 °C global warming. *Nature Climate Change*, v. 8, n. 12, p. 1053–1061, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/s41558-018-0305-8>>.

PELTZ, C. D.; HARLEY, A. Biochar Application for Abandoned Mine Land Reclamation. In: GUO, M.; HE, Z.; UCHIMIYA, S. M. (Org.). . *Agricultural and Environmental Applications of Biochar: Advances and Barriers*. Madison, WI: SSSA, 2016. p. 325–340. Disponível em: <<https://dl.sciencesocieties.org/publications/books/abstracts/sssaspecialpubl/sssaspecpub63/sssaspecpub63.2014.0047.5>>.

PETROLI, V. FS investe cerca de R\$ 350 mi em sistema BECCS para captura e estocagem de carbono. *Canal Rural*, mar. 2023. Disponível em: <<https://www.canalrural.com.br/mato-grosso/fs-investe-cerca-de-r-350-mi-em-sistema-beccs-para-captura-e-estocagem-de-carbono/>>.

POLIVKA, B. J. The Great London Smog of 1952. *AJN, American Journal of Nursing*, v. 118, n. 4, p. 57–61, abr. 2018. Disponível em: <<https://journals.lww.com/00000446-201804000-00034>>.

POLZ, J. A. Recuperação de áreas impactadas pela mineração de carvão a céu aberto

em Santa Catarina: gestão de rejeitos e revegetação. In: SOARES, P. S. M.; SANTOS, M. D. C. DOS; POSSA, M. V. (Org.). . *Carvão Brasileiro: Tecnologia e Meio Ambiente*. 1. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. p. 75–92.

PORTUGAL-PEREIRA, J.; SORIA, R.; RATHMANN, R.; SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. Agricultural and agro-industrial residues-to-energy: Techno-economic and environmental assessment in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, v. 81, n. April, p. 521–533, 2015.

PRASAD, R. S.; SUD, R. The pivotal role of UNFCCC in the international climate policy landscape: a developing country perspective. *Global Affairs*, v. 7, n. 1, p. 67–78, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/23340460.2021.1912628>>.

PUIG, D.; HASELIP, J. A.; BAKHTIARI, F. The mismatch between the in-country determinants of technology transfer, and the scope of technology transfer initiatives under the United Nations Framework Convention on Climate Change. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, v. 18, n. 5, p. 659–669, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10784-018-9405-1>>.

QUADER, M. A.; AHMED, S.; GHAZILLA, R. A. R.; AHMED, S.; DAHARI, M. A comprehensive review on energy efficient CO2 breakthrough technologies for sustainable green iron and steel manufacturing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 50, n. October, p. 594–614, 2015.

RATHMANN, R.; SCHAEFFER, R.; RAJÃO, R.; SZKLO, A.; VINHOZA, A.; NOGUEIRA, A. C.; LUCENA, A.; MARCOLINO, C. P.; SILVA, F. T. F. DA; NUNES, F.; CARVALHO, F.; TAGOMORI, I.; VELOSO, L. V. S.; ROCHEDO, P.; BITTENCOURT, S. R. M. DE; MENDONÇA, A. M. *Relatório de avaliação de necessidades tecnológicas para implementação de planos de ação climática no Brasil: mitigação*. 1. ed. Brasília: Ministério de Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, 2021.

RATHMANN, R.; SCHAEFFER, R.; RAJÃO, R.; SZKLO, A.; VINHOZA, A.; NOGUEIRA, A. C.; LUCENA, A.; MARCOLINO, C. P.; NUNES, F. T. F. DA S.; NUNES, F.; CARVALHO, F.; TAGOMORI, I.; VELOSO, L. V. S.; ROCHEDO, P.; BITTENCOURT, S. R. M. DE; MENDONÇA, A. M. *Report on the technology needs assessment for the implementation of climate action plans in Brazil: mitigation*.

Disponível em:

<<https://sirene.mctic.gov.br/portal/export/sites/sirene/backend/galeria/arquivos/2021/05/20/1.-TNA-report-mitigation.pdf>>.

RATHMANN, R.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. Land use competition for production of food and liquid biofuels: An analysis of the arguments in the current debate.

Renewable Energy, v. 35, n. 1, p. 14–22, 2010.

RATHMANN, R.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. Targets and results of the Brazilian Biodiesel Incentive Program - Has it reached the Promised Land? *Applied Energy*, v.

97, p. 91–100, 2012.

REID, H.; LIEUW-KIE-SONG, M. *Green works to support a just transition*. . Geneva: [s.n.], 2022.

REIMERS, L. L. *Just Transition Policy Brief: Sectoral Policies for a Just Transition towards Environmentally Sustainable Economies and Societies for All*. . Geneva: [s.n.],

2022. Disponível em: <https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_emp/---emp_ent/documents/publication/wcms_858856.pdf>.

RENTIZELAS, A. A.; TOLIS, A. J.; TATSIPOULOS, I. P. Logistics issues of biomass: The storage problem and the multi-biomass supply chain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, n. 4, p. 887–894, 2009.

RESENDE, N. DAS G. DE A. DA M.; MONTE, M. B. DE M.; PAIVA, P. R. P. DE. Zeólitas Naturais. In: LUZ, A. B. DA; LINS, F. A. F. (Org.). *Rochas Minerais Industriais: Usos e Aplicações*. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. p. 889–916.

RIahi, K.; VAN VUUREN, D. P.; KRIEGLER, E.; EDMONDS, J.; O’NEILL, B. C.; FUJIMORI, S.; BAUER, N.; CALVIN, K.; DELLINK, R.; FRICKO, O.; LUTZ, W.; POPP, A.; CUARESMA, J. C.; KC, S.; LEIMBACH, M.; JIANG, L.; KRAM, T.; RAO, S.; EMMERLING, J.; EBI, K.; HASEGAWA, T.; HAVLIK, P.; HUMPENÖDER, F.; ALELUIA REIS, L.; SMITH, S.; STEHFEST, E.; BOSETTI, V.; EOM, J.; GERNAAT, D.; MASUI, T.; ROGELJ, J.; STREFLER, J.; DROUET, L.; KREY, V.; LUDERER, G.; HARMSSEN, M.; TAKAHASHI, K.; BAUMSTARK, L.; DOELMAN, J. C.; KAINUMA, M.; KLIMONT, Z.; MARANGONI, G.; LOTZE-CAMPEN, H.; OBERSTEINER, M.; TABEAU, A.; TAVONI, M. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An

overview. *Global Environmental Change*, v. 42, p. 153–168, 2017.

RISSMAN, J.; BATAILLE, C.; MASANET, E.; ADEN, N.; MORROW, W. R.; ZHOU, N.; ELLIOTT, N.; DELL, R.; HEEREN, N.; HUCKESTEIN, B.; CRESKO, J.; MILLER, S. A.; ROY, J.; FENNELL, P.; CREMMINS, B.; KOCH BLANK, T.; HONE, D.; WILLIAMS, E. D.; DE LA RUE DU CAN, S.; SISSON, B.; WILLIAMS, M.; KATZENBERGER, J.; BURTRAW, D.; SETHI, G.; PING, H.; DANIELSON, D.; LU, H.; LORBER, T.; DINKEL, J.; HELSETH, J. Technologies and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation drivers through 2070. *Applied Energy*, v. 266, n. November 2019, p. 114848, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114848>>.

RITCHIE, H.; ROSER, M.; ROSADO, P. *Energy*. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/grapher/electricity-mix-uk>>. Acesso em: 5 out. 2023.

ROCHEDO, P. R. R. *Análise econômica sob incerteza da captura de carbono em termoelétricas a carvão: retrofitting e capture-ready*. 2011. 346 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <http://www.ppe.ufrj.br/images/publicações/mestrado/Pedro_Rua_Rodriguez_Rochedo.pdf>.

ROCHEDO, P. R. R.; COSTA, I. V. L.; IMPÉRIO, M.; HOFFMANN, B. S.; MERSCHMANN, P. R. D. C.; OLIVEIRA, C. C. N.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. Carbon capture potential and costs in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 131, p. 280–295, 2016.

ROCHEDO, P. R. R.; SOARES-FILHO, B.; SCHAEFFER, R.; VIOLA, E.; SZKLO, A.; LUCENA, A. F. P.; KOBERLE, A.; DAVIS, J. L.; RAJÃO, R.; RATHMANN, R. The threat of political bargaining to climate mitigation in Brazil. *Nature Climate Change*, v. 8, n. 8, p. 695–698, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41558-018-0213-y>>.

ROCHEDO, P. R. R.; SZKLO, A. Designing learning curves for carbon capture based on chemical absorption according to the minimum work of separation. *Applied Energy*, v. 108, p. 383–391, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.03.007>>.

RODRÍGUEZ-POSE, A. The revenge of the places that don't matter (and what to do

about it). *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, v. 11, n. 1, p. 189–209, 2018.

ROELFSEMA, M.; VAN SOEST, H. L.; HARMSSEN, M.; VAN VUUREN, D. P.; BERTRAM, C.; DEN ELZEN, M.; HÖHNE, N.; IACOBUTA, G.; KREY, V.; KRIEGLER, E.; LUDERER, G.; RIAHI, K.; UECKERDT, F.; DESPRÉS, J.; DROUET, L.; EMMERLING, J.; FRANK, S.; FRICKO, O.; GIDDEN, M.; HUMPENÖDER, F.; HUPPMANN, D.; FUJIMORI, S.; FRAGKIADAKIS, K.; GI, K.; KERAMIDAS, K.; KÖBERLE, A. C.; ALELUIA REIS, L.; ROCHEDO, P.; SCHAEFFER, R.; OSHIRO, K.; VRONTISI, Z.; CHEN, W.; IYER, G. C.; EDMONDS, J.; KANNAVOU, M.; JIANG, K.; MATHUR, R.; SAFONOV, G.; VISHWANATHAN, S. S. Taking stock of national climate policies to evaluate implementation of the Paris Agreement. *Nature Communications*, v. 11, n. 1, p. 1–12, 2020.

ROGELJ, J.; LUDERER, G.; PIETZCKER, R. C.; KRIEGLER, E.; SCHAEFFER, M.; KREY, V.; RIAHI, K. Energy system transformations for limiting end-of-century warming to below 1.5 °C. *Nature Climate Change*, v. 5, n. 6, p. 519–527, 1 jun. 2015. Disponível em: <<http://www.nature.com/articles/nclimate2572>>.

ROGELJ, J.; DEN ELZEN, M.; HÖHNE, N.; FRANSEN, T.; FEKETE, H.; WINKLER, H.; SCHAEFFER, R.; SHA, F.; RIAHI, K.; MEINSHAUSEN, M. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. *Nature*, v. 534, n. 7609, p. 631–639, jun. 2016.

ROSEMBERG, A. Building a Just Transition: The linkages between climate change and employment. *International Journal of Labour Research*, v. 2, n. 2, p. 121–162, 2010. Disponível em: <[https://www.ilo.org/public/libdoc/ilo/P/09238/09238\(2010-2\)125-161.pdf](https://www.ilo.org/public/libdoc/ilo/P/09238/09238(2010-2)125-161.pdf)>.

RUBIO, M. D. M.; FOLCHI, M. Will small energy consumers be faster in transition? Evidence from the early shift from coal to oil in Latin America. *Energy Policy*, v. 50, p. 50–61, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.03.054>>.

S&P GLOBAL. *Zeolites*. Disponível em: <<https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/ci/products/zeolites-chemical-economics-handbook.html>>. Acesso em: 2 mar. 2023.

SANDERSON, B. M.; O'NEILL, B. C. Assessing the costs of historical inaction on climate change. *Scientific Reports*, v. 10, n. 1, p. 1–12, 2020.

SANTA CATARINA, A. Wind power generation in Brazil: An overview about investment and scale analysis in 758 projects using the Levelized Cost of Energy. *Energy Policy*, v. 164, n. March, p. 112830, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112830>>.

SATC. *Comunicação pessoal com Thiago Aquino*. . Criciúma: [s.n.], 2020

SATC. *Testes avaliam planta de captura de carbono*. Disponível em: <<https://web.satc.edu.br/2019/10/testes-avaliam-planta-de-captura-de-carbono/>>. Acesso em: 13 dez. 2019.

SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. S.; LUCENA, A. F. P. DE; MOREIRA CESAR BORBA, B. S.; PUPO NOGUEIRA, L. P.; FLEMING, F. P.; TROCCOLI, A.; HARRISON, M.; BOULAHYA, M. S. *Energy sector vulnerability to climate change: A review*. *Energy*. [S.l: s.n.], 2012

SCHAEFFER, R.; PORTUGAL-PEREIRA, J.; IMPÉRIO, M.; VASQUEZ-ARROYO, E. *O Brasil e as mudanças climáticas*. Disponível em: <<https://pp.nexojornal.com.br/linha-do-tempo/2020/O-Brasil-e-as-mudanças-climáticas>>. Acesso em: 16 out. 2023.

SCHAEFFER, R.; RAJÃO, R.; SZKLO, A.; RATHMANN, R.; VINHOZA, A.; LUCENA, A.; CALLEGARI, C.; MARCOLINO, C. P.; SALOMÃO, C. DE S. C.; TORAL, F. L. B.; SILVA, F. T. F. DA; CARVALHO, F.; FREITAS, J. S.; VELOSO, L. V. S.; ROSADO, L. R.; BEGHIN, L. DE S.; BAPTISTA, L. B.; BARROSO, M. B. C.; MAIA, P. L. B.; ROCHEDO, P.; MORAIS, T. N.; BITTENCOURT, S. R. M. DE; MENDONÇA, A. M. *Technology action plans for the energy system, agriculture, forestry and other land use sectors*. Disponível em: <<https://sirene.mctic.gov.br/portal/export/sites/sirene/backend/galeria/arquivos/2021/05/20/2.-Technology-action-plans-mitigation.pdf>>.

SCHWEINFURTH, S. P. *An Introduction to Coal Quality. The National Coal Resource Assessment Overview*, USGS Professional Paper series., nº 1625-F. Reston, Virginia: [s.n.], 2009.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential

economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, v. 114, n. June, p. 2–26, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>>.

SEMENZA, J. C.; EBI, K. L. Climate change impact on migration, travel, travel destinations and the tourism industry. *Journal of Travel Medicine*, v. 26, n. 5, p. 1–13, 2019.

SHARMA, P.; KUMAR, S. N. The global governance of water, energy, and food nexus: allocation and access for competing demands. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, v. 20, n. 2, p. 377–391, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10784-020-09488-2>>.

SIECESC - SINDICATO DAS INDÚSTRIAS DE EXTRAÇÃO DE CARVÃO DO ESTADO DE SANTA CATARINA. *Carvão mineral – dados estatísticos do ano 2022*. . Criciúma: [s.n.], 2022.

SILVA, L.; WARD, C.; HOWER, J.; IZQUIERDO, M.; WAANDERS, F.; OLIVEIRA, M.; LI, Z.; HATCH, R.; QUEROL, X. Mineralogy and Leaching Characteristics of Coal Ash from a Major Brazilian Power Plant. *Coal Combustion and Gasification Products*, v. 2, n. 1, p. 51–65, 2010.

SILVESTRE, A.; VIEIRA, E.; BARRETO, L. Importância das zeólitas na indústria do petróleo e no craqueamento em leito fluidizado (FCC). *Bolsista de Valor: Revista de divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense*, v. 2, p. 63–75, 2012.

SINGH, A. K.; SAHU, J. N. Coal mine gas: a new fuel utilization technique for India. *International Journal of Green Energy*, v. 15, n. 12, p. 732–743, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/15435075.2018.1529572>>.

SMIL, V. *Energy Transitions: History, Requirements, Prospects*. Santa Barbara, California: Praeger, 2010a.

SMIL, V. Examining energy transitions: A dozen insights based on performance. *Energy Research and Social Science*, v. 22, p. 194–197, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.erss.2016.08.017>>.

SMIL, V. *Power Density Primer: Understanding the Spatial Dimension of the Unfolding Transition to Renewable Electricity Generation (Part V – Comparing the*

Power Densities of Electricity Generation). Disponível em: <<http://vaclavsmil.com/wp-content/uploads/docs/smil-article-power-density-primer.pdf>>. Acesso em: 29 maio 2023b.

SMITH, P.; DAVIS, S. J.; CREUTZIG, F.; FUSS, S.; MINX, J.; GABRIELLE, B.; KATO, E.; JACKSON, R. B.; COWIE, A.; KRIEGLER, E.; VAN VUUREN, D. P.; ROGELJ, J.; CIAIS, P.; MILNE, J.; CANADELL, J. G.; MCCOLLUM, D.; PETERS, G.; ANDREW, R.; KREY, V.; SHRESTHA, G.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GASSER, T.; GRÜBLER, A.; HEIDUG, W. K.; JONAS, M.; JONES, C. D.; KRAXNER, F.; LITTLETON, E.; LOWE, J.; MOREIRA, J. R.; NAKICENOVIC, N.; OBERSTEINER, M.; PATWARDHAN, A.; ROGNER, M.; RUBIN, E.; SHARIFI, A.; TORVANGER, A.; YAMAGATA, Y.; EDMONDS, J.; YONGSUNG, C. Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions. *Nature Climate Change*, v. 6, n. 1, p. 42–50, 7 jan. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2870>>.

SNIC. *Roadmap Tecnológico do Cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050*. . Rio de Janeiro: [s.n.], 2019.

SNYDER, B. F. Vulnerability to decarbonization in hydrocarbon-intensive counties in the United States: A just transition to avoid post-industrial decay. *Energy Research and Social Science*, v. 42, n. September 2017, p. 34–43, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.03.004>>.

SOARES, J. B.; SZKLO, A. S.; TOLMASQUIM, M. T. Alternative depreciation policies for promoting combined heat and power (CHP) development in Brazil. *Energy*, v. 31, n. 8–9, p. 1151–1166, 2006.

SOCCOL, C. R.; VANDENBERGHE, L. P. DE S.; MEDEIROS, A. B. P.; KARP, S. G.; BUCKERIDGE, M.; RAMOS, L. P.; PITARELO, A. P.; FERREIRA-LEITÃO, V.; GOTTSCHALK, L. M. F.; FERRARA, M. A.; SILVA BON, E. P. DA; MORAES, L. M. P. DE; ARAÚJO, J. DE A.; TORRES, F. A. G. Bioethanol from lignocelluloses: Status and perspectives in Brazil. *Bioresource Technology*, v. 101, n. 13, p. 4820–4825, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.067>>.

SONGOLZADEH, M.; RAVANCHI, M. T.; SOLEIMANI, M. Carbon Dioxide Capture and Storage : A General Review on Adsorbents. *International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*, v. 6, n. 10, p. 900–907,

2012.

SOVACOOOL, B. K.; TURNHEIM, B.; MARTISKAINEN, M.; BROWN, D.; KIVIMAA, P. Guides or gatekeepers? Incumbent-oriented transition intermediaries in a low-carbon era. *Energy Research and Social Science*, v. 66, n. February, p. 101490, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101490>>.

SOVACOOOL, B. K. How long will it take? Conceptualizing the temporal dynamics of energy transitions. *Energy Research and Social Science*, v. 13, p. 202–215, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.erss.2015.12.020>>.

SOVACOOOL, B. K.; GEELS, F. W. Further reflections on the temporality of energy transitions: A response to critics. *Energy Research and Social Science*, v. 22, p. 232–237, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.erss.2016.08.013>>.

SPENCER, T.; COLOMBIER, M.; SARTOR, O.; GARG, A.; TIWARI, V.; BURTON, J.; CAETANO, T.; GREEN, F.; TENG, F.; WISEMAN, J. The 1.5°C target and coal sector transition: at the limits of societal feasibility. *Climate Policy*, v. 18, n. 3, p. 335–351, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/14693062.2017.1386540>>.

STEINER, C.; TEIXEIRA, W. G.; LEHMANN, J.; NEHLS, T.; DE MACÊDO, J. L. V.; BLUM, W. E. H.; ZECH, W. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant and Soil*, v. 291, n. 1–2, p. 275–290, 2007.

STERN, N. *The economics of climate change: The stern review. The Economics of Climate Change: The Stern Review*. London: [s.n.], 2007.

STREFLER, J.; AMANN, T.; BAUER, N.; KRIEGLER, E.; HARTMANN, J. Potential and costs of carbon dioxide removal by enhanced weathering of rocks. *Environmental Research Letters*, v. 13, n. 3, 2018.

SUNDQVIST, G.; LETELL, M.; LIDSKOG, R. Science and policy in air pollution abatement strategies. *Environmental Science and Policy*, v. 5, n. 2, p. 147–156, 2002.

SWANSON, R. M.; PLATON, A.; SATRIO, J. A.; BROWN, R. C. Techno-economic analysis of biomass-to-liquids production based on gasification. *Fuel*, v. 89, n. SUPPL. 1, p. S11–S19, 2010.

SYMONS, J.; KARLSSON, R. Green political theory in a climate-changed world:

between innovation and restraint. *Environmental Politics*, v. 24, n. 2, p. 173–192, 2015.

SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. Alternative energy sources or integrated alternative energy systems? Oil as a modern lance of Peleus for the energy transition. *Energy*, v. 31, n. 14, p. 2177–2186, 2006.

TAGOMORI, I. S.; CARVALHO, F. M.; DA SILVA, F. T. F.; DE C. MERSCHMANN, P. R.; ROCHEDO, P. R. R.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. Designing an optimum carbon capture and transportation network by integrating ethanol distilleries with fossil-fuel processing plants in Brazil. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 68, n. October, p. 112–127, 1 jan. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1750583617304395?via%3Dihub>>. Acesso em: 13 dez. 2018.

TAGOMORI, I. S. Potencial Técnico e Econômico para a Produção de Fischer-Tropsch Diesel a partir de Biomassa (FT-BTL) Associada à Captura de Carbono no Brasil. v. 102, n. 4, p. 24–25, 2017.

TAGOMORI, I. S.; ROCHEDO, P. R. R.; SZKLO, A. Techno-economic and georeferenced analysis of forestry residues-based Fischer-Tropsch diesel with carbon capture in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, v. 123, p. 134–148, abr. 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953419300881>>.

TANZER, S. E.; RAMÍREZ, A. When are negative emissions negative emissions? *Energy and Environmental Science*, v. 12, n. 4, p. 1210–1218, 2019.

THEIS, J. *Quality guidelines for energy system studies: Cost estimation methodology for NETL assessments of power plant performance*. . Pittsburgh: [s.n.], 2019. Disponível em: <https://www.netl.doe.gov/projects/files/QGESSCostEstMethodforNETLAssessmentsofPowerPlantPerformance_090119.pdf>.

THRONSEN, M. A new record for Norwegian EV sales in 2021: Almost 65 percent of all new cars sold in 2021 were fully electric. *Norsk Elbilforening*, 2022. Disponível em: <<https://elbil.no/a-milestone-for-electric-cars-in-norway/>>.

TNO. *Phyllis2, database for (treated) biomass, algae, feedstocks for biogas production and biochar*. Disponível em: <<https://phyllis.nl/>>. Acesso em: 6 jun. 2023.

TRAN, T. H.; EGERMANN, M. Land-use implications of energy transition pathways towards decarbonisation – Comparing the footprints of Vietnam, New Zealand and Finland. *Energy Policy*, v. 166, n. March, p. 112951, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112951>>.

TURETSKY, M. R.; JONES, M. C.; WALTER ANTHONY, K.; OLEFELDT, D.; SCHUUR, E. A. G.; KOVEN, C.; MCGUIRE, A. D.; GROSSE, G. Permafrost collapse is accelerating carbon release. *Nature*, v. 569, p. 32–24, 2019.

TURNHEIM, B. *The destabilisation of existing regimes in socio-technical transitions: Theoretical explorations and in-depth case studies of the British coal industry (1880-2011)*. 2012. 373 f. University of Sussex, 2012.

TURNHEIM, B.; GEELS, F. W. Incumbent actors, guided search paths, and landmark projects in infra-system transitions: Re-thinking Strategic Niche Management with a case study of French tramway diffusion (1971–2016). *Research Policy*, v. 48, n. 6, p. 1412–1428, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.respol.2019.02.002>>.

TURNHEIM, B.; GEELS, F. W. Regime destabilisation as the flipside of energy transitions: Lessons from the history of the British coal industry (1913-1997). *Energy Policy*, v. 50, p. 35–49, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.04.060>>.

TURNHEIM, B.; SOVACOO, B. K. Forever stuck in old ways? Pluralising incumbencies in sustainability transitions. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, v. 35, n. October 2019, p. 180–184, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.eist.2019.10.012>>.

UNA-PROSIL. *Website da UNA-PROSIL*. Disponível em: <<https://www.una-prosil.com.br/industria>>. Acesso em: 5 mar. 2023.

UNEP - UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. *Emissions Gap Report 2022: The Closing Window — Climate crisis calls for rapid transformation of societies*. Nairobi: UNEP, 2022. Disponível em: <<https://www.unep.org/emissions-gap-report-2022>>.

UNFCCC. Adoption of the Paris Agreement - Proposal by the President - Draft decision -/CP.21. *Conference of the Parties on its twenty-first session*, v. 21932, n. December, p. 1–32, 2015. Disponível em:

<<http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>>.

UNFCCC - UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. Glasgow Cop26 on Climate Change Conference. 2021, Glasgow: UNFCCC, 2021. p. 1–46. Disponível em:

<https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2021_10E.pdf>.

ÜRGE-VORSATZ, D.; HERRERO, S. T.; DUBASH, N. K.; LECOCQ, F. Measuring the co-benefits of climate change mitigation. *Annual Review of Environment and Resources*, v. 39, n. February 2015, p. 549–582, 2014.

US GAO - UNITED STATES GOVERNMENT ACCOUNTABILITY OFFICE. *Technology Assessment - Decarbonization: Status, Challenges, and Policy Options for Carbon Capture, Utilization, and Storage*. . Washington, D.C.: [s.n.], 2022.

USGS. *2018 Minerals Yearbook - Zeolites. USGS science for a changing world*. Washington, D.C.: [s.n.], 2021. Disponível em: <<https://www.usgs.gov>>.

VALENTIM BASTOS, J. B.; SOARES SANTOS MAIA, J. G.; BORSCHIVER, S.; SZKLO, A.; SECCHI, A. R. Addressing scale and seasonality in the design of sugarcane to ethylene glycol biorefineries. *Journal of Cleaner Production*, v. 337, n. May 2021, 2022.

VAN BEKKUM, H.; FLANIGEN, E. M.; JANSEN, J. C. *Introduction to zeolite science and practice*. I ed. Amsterdam: Elsevier, 1991.

VAN BREEVORT, P.; BLOK, K.; HAGEMANN, M.; FEKETE, H.; HÖHNE, N.; HARE, B.; SCHAEFFER, M.; ROCHA, M.; JEFFERY, L. *The Coal Gap : planned coal-fired power plants inconsistent with 2°C and threaten achievement of INDCs*. . New York, NY: [s.n.], 2015. Disponível em: <http://climateactiontracker.org/assets/publications/briefing_papers/CAT_Coal_Gap_Briefing_COP21.pdf>.

VAN VUUREN, D. P.; STEHFEST, E.; GERNAAT, D. E. H. J.; VAN DEN BERG, M.; BIJL, D. L.; DE BOER, H. S.; DAIIOGLOU, V.; DOELMAN, J. C.; EDELENBOSCH, O. Y.; HARMSSEN, M.; HOF, A. F.; VAN SLUISVELD, M. A. E. Alternative pathways to the 1.5 °c target reduce the need for negative emission technologies. *Nature Climate Change*, v. 8, n. 5, p. 391–397, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/s41558-018-0119-8>>.

VAUGHAN, N. E.; GOUGH, C.; MANDER, S.; LITTLETON, E. W.; WELFLE, A.; GERNAAT, D. E. H. J.; VAN VUUREN, D. P. Evaluating the use of biomass energy with carbon capture and storage in low emission scenarios. *Environmental Research Letters*, v. 13, n. 4, 2018.

VERGNHANINI FILHO, R. Emissão de óxidos de enxofre (SO_x) na combustão industrial. *Revista IPT / Tecnologia e Inovação*, v. 4, n. 14, p. 65–76, 2020.

VERGNHANINI, R. Emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x) na combustão industrial. *Revista IPT / Tecnologia e Inovação*, v. 1, n. 3, p. 6–19, 2016. Disponível em: <<http://revista.ipt.br/index.php/revistaIPT/article/view/24/16>>.

VIEIRA, L. H.; RODRIGUES, M. V.; MARTINS, L. SEED-ASSISTED BEHAVIOR OF ZEOLITE CRYSTALLIZATION. *Química Nova*, v. 37, n. 7, p. 1008–1017, 2014. Disponível em: <<http://www.gnresearch.org/doi/10.5935/0100-4042.20140229>>.

VIGLIO, J. E.; CALVIMONTES, J.; FERREIRA, L. C. Conflitos e negociações entre a indústria do petróleo e a conservação da Mata Atlântica no Litoral Norte de São Paulo, Brasil. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, v. 42, p. 287–307, 24 dez. 2017. Disponível em: <<http://revistas.ufpr.br/made/article/view/47079>>.

VILLARROEL-ROCHA, J.; ARAÚJO, M. J. G. DE; SAPAG, K.; PERGHER, S. Estudo de Zeólita Natural Modificada para Captura e Armazenamento de Gases. 2021, Cotia (SP): Zeogroup, 2021. p. 32–33. Disponível em: <<https://app.4.events/anais>>.

VISCONDI, G. DE F.; SILVA, A. F.; CUNHA, K. B. *Geração termoelétrica e emissões atmosféricas: poluentes e sistemas de controle. Termoeletricidade em Foco*. São Paulo: [s.n.], 2016. Disponível em: <<https://iema-site-staging.s3.amazonaws.com/IEMA-EMISSOES.pdf>>.

VIVIESCAS, C.; LIMA, L.; DIUANA, F. A.; VASQUEZ, E.; LUDOVIQUE, C.; SILVA, G. N.; HUBACK, V.; MAGALAR, L.; SZKLO, A.; LUCENA, A.; SCHAEFFER, R.; PAREDES, J. R. Contribution of Variable Renewable Energy to increase energy security in Latin America: Complementarity and climate change impacts on wind and solar resources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 113, p. 109232, out. 2019.

WALKER, A. P.; DE KAUWE, M. G.; BASTOS, A.; BELMECHERI, S.; GEORGIU, K.; ZUIDEMA, P. A.; et al. Integrating the evidence for a terrestrial

carbon sink caused by increasing atmospheric CO₂. *New Phytologist*, v. 229, n. 5, p. 2413–2445, 2021.

WALLQUIST, L.; SEIGO, S. L. O.; VISSCHERS, V. H. M.; SIEGRIST, M. Public acceptance of CCS system elements: A conjoint measurement. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 6, p. 77–83, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2011.11.008>>.

WANG, C.; LV, T.; CAI, R.; XU, J.; WANG, L. Bibliometric Analysis of Multi-Level Perspective on Sustainability Transition Research. *Sustainability (Switzerland)*, v. 14, n. 7, 2022.

WEBLEY, P. A. Adsorption technology for CO₂ separation and capture: a perspective. *Adsorption*, v. 20, n. 2–3, p. 225–231, fev. 2014. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10450-014-9603-2>>.

WILLIAMS, C. D. Application of Zeolites to Environmental Remediation. *Urban Pollution*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2018. p. 249–258. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781119260493.ch19>>.

WOOD. *Assessing the Cost Reduction Potential and Competitiveness of Novel (Next Generation) UK Carbon Capture Technology Benchmarking State-of-the-art and Next Generation Technologies. Literature Review.* . Reading, UK: [s.n.], 2018. Disponível em: <https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/800680/Literature_Review_Report_Rev_2A__1_.pdf>.

WOOLF, D.; AMONETTE, J. E.; STREET-PERROTT, F. A.; LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications*[1] D. Woolf, J.E. Amonette, F.A. Street-Perrott, J. Lehmann, S. Joseph, Sustainable biochar to mitigate global climate change, *Nat. Commun. 1* (2010) 1–9. <https://doi.org/10.1038/ncomms1053>., v. 1, n. 5, p. 1–9, ago. 2010. Disponível em: <<http://www.nature.com/doi/10.1038/ncomms1053>>.

WORKMAN, M.; DOOLEY, K.; LOMAX, G.; MALTBY, J.; DARCH, G. Decision making in contexts of deep uncertainty - An alternative approach for long-term climate policy. *Environmental Science and Policy*, v. 103, n. April 2019, p. 77–84, 2020.

WRIGLEY, E. A. Energy and the English Industrial Revolution. *Philosophical*

Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, v. 371, n. 1986, p. 20110568, 13 mar. 2013. Disponível em: <<http://choicereviews.org/review/10.5860/CHOICE.48-4603>>.

WWF BRASIL. *Dia de sobrecarga da Terra*. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/nosso_trabalho/pegada_ecologica/>. Acesso em: 21 out. 2023.

XU, R.; PANG, W.; YU, J.; HUO, Q.; CHEN, J. *Chemistry of Zeolites and Related Porous Materials*. [S.l.]: Wiley, 2007. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470822371>>.

YILMAZ, B.; TRUKHAN, N.; MÜLLER, U. Industrial outlook on zeolites and metal organic frameworks. *Cuihua Xuebao/Chinese Journal of Catalysis*, v. 33, n. 1, p. 3–10, 2012.

YORK, R. Do alternative energy sources displace fossil fuels? *Nature Climate Change*, v. 2, n. 6, p. 441–443, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1451>>.

YORK, R.; BELL, S. E. Energy transitions or additions?: Why a transition from fossil fuels requires more than the growth of renewable energy. *Energy Research and Social Science*, v. 51, n. November 2018, p. 40–43, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.01.008>>.

ZANON-ZOTIN, M.; BERGMAN-FONTE, C.; NOGUEIRA, T.; BARBOSA, L.; CARVALHO, L.; ANGELKORTE, G.; CAROLINA, A.; FIORINI, O.; RUA, P.; ROCHEDO, R.; PORTUGAL-PEREIRA, J.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. Unpacking bio-based alternatives to ethylene production in Brazil , Europe , and the United States : A comparative life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, v. 428, n. September, p. 139376, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139376>>.

ZEVENHOVEN-ONDERWATER, M.; BACKMAN, R.; SKRIFVAR, B. J.; HUPA, M.; LILIENDAHL, T.; ROSÉN, C.; SJÖSTRÖM, K.; ENGVALL, K.; HALLGREN, A. The ash chemistry in fluidised bed gasification of biomass fuels. Part I: Predicting the chemistry of melting ashes and ash-bed material interaction. *Fuel*, v. 80, n. 10, p. 1489–1502, 2001.

ZGUREVA, D.; BOYCHEVA, S. Novel Technical and Economical Superior Approach

for Synthesis of Zeolites From Coal Fly Ash. *Ecological Engineering and Environment Protection*, n. 2, p. 12–18, 2015.

ZHANG, J. J.; SAMET, J. M. Chinese haze versus Western smog: Lessons learned. *Journal of Thoracic Disease*, v. 7, n. 1, p. 3–13, 2015.

ZHANG, Z.; XIAO, Y.; WANG, B.; SUN, Q.; LIU, H. Waste is a Misplayed Resource: Synthesis of Zeolites from Fly Ash for CO₂ Capture. *Energy Procedia*, v. 114, n. November 2016, p. 2537–2544, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.036>>.

ZULLO, J.; PEREIRA, V. R.; KOGA-VICENTE, A. Sugar-energy sector vulnerability under CMIP5 projections in the Brazilian central-southern macro-region. *Climatic Change*, v. 149, n. 3–4, p. 489–502, 2018.

Apêndice A – Detalhamento de custos da análise técnico-econômica

A1: Usina termelétrica a carvão mineral

Caso Sem CCS

CAPEX					
Itens	CPE	EPC	CProc	CProj	CTP
Controle de NOx na caldeira	4.882.000	976.400	351.504	1.241.981	7.451.885
Controle de NOx pós-combustão	10.910.000	2.182.000	785.520	2.775.504	16.653.024
Controle de mercúrio	29.880	5.976	2.151	7.601	45.609
Controle de material particulado	13.730.000	2.746.000	988.560	3.492.912	20.957.472
Controle de SO ₂	65.710.000	13.142.000	4.731.120	16.716.624	100.299.744
Captura de CO ₂	-	-	-	-	-
Torre de arrefecimento	13.220.000	2.644.000	951.840	3.363.168	20.179.008
Tratamento de água residual	8.825.000	1.765.000	635.400	2.245.080	13.470.480
Planta base	373.200.000	74.640.000	26.870.400	94.942.080	569.652.480
Total (US\$)	490.506.880	98.101.376	35.316.495	124.784.950	748.709.702
Total anualizado (US\$/ano)	43.570.467	8.714.093	3.137.074	11.084.327	66.505.961

OPEX_{fix}		OPEX_{var}	
Componente	Valor	Insumo	Valor
Operadores	944.482	Combustível	56.910.000
Supervisão	283.344	Água	1.781.470
Encargos de trabalho	585.578	Cal hidratada	844.100
Miscelânea	236.120	Descarte de resíduos	7.961.200
Manutenção	15.000.420	Reagentes químicos	1.381.000
Depreciação	16.350.229		
Total (US\$/ano)	33.400.175	Total (US\$/ano)	68.877.770

Caso CCS TSA

CAPEX					
Itens	CPE	EPC	CProc	CProj	CTP
Controle de NOx na caldeira	4.882.000	976.400	351.504	1.241.981	7.451.885
Controle de NOx pós-combustão	12.030.000	2.406.000	866.160	3.060.432	18.362.592
Controle de mercúrio	26.840	5.368	1.932	6.828	40.969
Controle de material particulado	15.440.000	3.088.000	1.111.680	3.927.936	23.567.616
Controle de SO ₂	70.200.000	14.040.000	5.054.400	17.858.880	107.153.280
Captura de CO ₂	274.400.000	54.880.000	19.756.800	69.807.360	418.844.160
Torre de arrefecimento	20.770.000	4.154.000	1.495.440	5.283.888	31.703.328
Tratamento de água residual	10.450.000	2.090.000	752.400	2.658.480	15.950.880
Planta base	404.000.000	80.800.000	29.088.000	102.777.600	616.665.600
Total (US\$)	812.198.840	162.439.768	58.478.316	206.623.385	1.239.740.309
Total anualizado (US\$/ano)	72.145.538	14.429.108	5.194.479	18.353.825	110.122.950

OPEX_{fix}		OPEX_{var}	
Componente	Valor	Insumo	Valor
Operadores	1.046.352	Combustível	66.220.000
Supervisão	283.345	Água	127.390
Encargos de trabalho	636.514	Cal hidratada	982.100
Miscelânea	261.588	Descarte de resíduos	8.601.000
Manutenção	25.887.360	Reagentes químicos	1.607.000
Depreciação	27.073.295	Adsorvente	5.688.257
		Soda cáustica	3.430.000
Total (US\$/ano)	55.188.453	Total (US\$/ano)	86.655.747

Caso CCS TSA otm

CAPEX					
Itens	CPE	EPC	CProc	CProj	CTP
Controle de NOx na caldeira	4.882.000	976.400	351.504	1.241.981	7.451.885
Controle de NOx pós-combustão	10.910.000	2.182.000	785.520	2.775.504	16.653.024
Controle de mercúrio	27.230	5.446	1.961	6.927	41.564
Controle de material particulado	13.730.000	2.746.000	988.560	3.492.912	20.957.472
Controle de SO ₂	65.710.000	13.142.000	4.731.120	16.716.624	100.299.744
Captura de CO ₂	244.800.000	48.960.000	17.625.600	62.277.120	373.662.720
Torre de arrefecimento	23.510.000	4.702.000	1.692.720	5.980.944	35.885.664
Tratamento de água residual	10.770.000	2.154.000	775.440	2.739.888	16.439.328
Planta base	403.300.000	80.660.000	29.037.600	102.599.520	615.597.120
Total (US\$)	777.639.230	155.527.846	55.990.025	197.831.420	1.186.988.521
Total anualizado (US\$/ano)	69.075.697	13.815.139	4.973.450	17.572.857	105.437.144

OPEX_{fix}		OPEX_{var}	
Componente	Valor	Insumo	Valor
Operadores	1.046.352	Combustível	56.910.000
Supervisão	283.345	Água	2.004.470
Encargos de trabalho	636.514	Cal hidratada	844.100
Miscelânea	261.588	Descarte de resíduos	7.961.200
Manutenção	24.286.020,00	Reagentes químicos	1.381.000
Depreciação	25.921.307,67	Adsorvente	4.888.630
		Soda cáustica	2.948.000
Total (US\$/ano)	52.435.126	Total (US\$/ano)	76.937.400

Caso CCS ABS

CAPEX					
Itens	CPE	EPC	CProc	CProj	CTP
Controle de NOx na caldeira	4.882.000	976.400	351.504	1.241.981	7.451.885
Controle de NOx pós-combustão	12.660.000	2.532.000	911.520	3.220.704	19.324.224
Controle de mercúrio	25.730	5.146	1.853	6.546	39.274
Controle de material particulado	16.410.000	3.282.000	1.181.520	4.174.704	25.048.224
Controle de SO ₂	77.210.000	15.442.000	5.559.120	19.642.224	117.853.344
Captura de CO ₂	174.100.000	34.820.000	12.535.200	44.291.040	265.746.240
Torre de arrefecimento	19.370.000	3.874.000	1.394.640	4.927.728	29.566.368
Tratamento de água residual	10.560.000	2.112.000	760.320	2.686.464	16.118.784
Planta base	421.400.000	84.280.000	30.340.800	107.204.160	643.224.960
Total (US\$)	736.617.730	147.323.546	53.036.477	187.395.551	1.124.373.303
Total anualizado (US\$/ano)	65.431.862	13.086.372	4.711.094	16.645.866	99.875.195

OPEX_{fix}		OPEX_{var}	
Componente	Valor	Insumo	Valor
Operadores	1.046.352	Combustível	71.610.000
Supervisão	283.345	Água	2.078.560
Encargos de trabalho	636.514	Cal hidratada	1.062.000
Miscelânea	261.588	Descarte de resíduos	12.571.000
		Reagentes químicos	1.953.000
Manutenção	23.601.900	Adsorvente	11.830.000
		Soda cáustica	644.800
Depreciação	24.553.924	Inibidor de corrosão	2.365.000
		Carvão ativado	334.600
Total (US\$/ano)	1.046.352	Total (US\$/ano)	104.448.960

A2: Usina termelétrica a bagaço de cana-de-açúcar

Caso Sem CCS

CAPEX					
Itens	CPE	EPC	CProc	CProj	CTP
Controle de NOx na caldeira	1.479.000	295.800	106.488	376.258	2.257.546
Controle de NOx pós-combustão	18.040.000	3.608.000	1.298.880	4.589.376	27.536.256
Controle de mercúrio	-	-	-	-	-
Controle de material particulado	5.473.000	1.094.600	394.056	1.392.331	8.353.987
Controle de SO ₂	34.960.000	6.992.000	2.517.120	8.893.824	53.362.944
Captura de CO ₂	-	-	-	-	-
Torre de arrefecimento	5.265.000	1.053.000	379.080	1.339.416	8.036.496
Tratamento de água residual	5.811.000	1.162.200	418.392	1.478.318	8.869.910
Planta base	145.400.000	29.080.000	10.468.800	36.989.760	221.938.560
Total (US\$)	216.428.000	43.285.600	15.582.816	55.059.283	330.355.699
Total anualizado (US\$/ano)	19.224.744	3.844.949	1.384.182	4.890.775	29.344.649

OPEX_{fix}		OPEX_{var}	
Componente	Valor	Insumo	Valor
Operadores	960.730	Combustível	-
Supervisão	288.219	Água	32.235
Encargos de trabalho	595.653	Cal hidratada	465
Miscelânea	240.183	Descarte de resíduos	216.210
Manutenção	6.212.250	Reagentes químicos	13.390
Depreciação	7.214.267		
Total (US\$/ano)	15.511.301	Total (US\$/ano)	262.299

Caso CCS TSA

CAPEX					
Itens	CPE	EPC	CProc	CProj	CTP
Controle de NOx na caldeira	1.479.000	295.800	106.488	282.193	2.163.481
Controle de NOx pós-combustão	23.910.000	4.782.000	1.721.520	4.562.028	34.975.548
Controle de mercúrio	-	-	-	-	-
Controle de material particulado	7.142.000	1.428.400	514.224	1.362.694	10.447.318
Controle de SO ₂	41.910.000	8.382.000	3.017.520	7.996.428	61.305.948
Captura de CO ₂	181.200.000	36.240.000	13.046.400	34.572.960	265.059.360
Torre de arrefecimento	9.167.000	1.833.400	660.024	1.749.064	13.409.488
Tratamento de água residual	7.319.000	1.463.800	526.968	1.396.465	10.706.233
Planta base	181.500.000	36.300.000	13.068.000	34.630.200	265.498.200
Total (US\$)	453.627.000	90.725.400	32.661.144	86.552.032	663.565.576
Total anualizado (US\$/ano)	40.294.522	8.058.904	2.901.206	7.688.195	58.942.827

OPEX_{fix}		OPEX_{var}	
Componente	Valor	Insumo	Valor
Operadores	1.006.450	Combustível	-
Supervisão	288.219	Água	43.350
Encargos de trabalho	618.513	Cal hidratada	689
Miscelânea	251.613	Descarte de resíduos	320.660
Manutenção	14.068.770	Reagentes químicos	19.860
Depreciação	15.120.900	Adsorvente	8.477.778
		Soda cáustica	178.700
Total (US\$/ano)	27.000.111	Total (US\$/ano)	9.041.037

Caso CCS TSA otm

CAPEX					
Itens	CPE	EPC	CProc	CProj	CTP
Controle de NOx na caldeira	1.479.000	295.800	106.488	376.258	2.257.546
Controle de NOx pós-combustão	18.040.000	3.608.000	1.298.880	4.589.376	27.536.256
Controle de mercúrio	-	-	-	-	-
Controle de material particulado	5.473.000	1.094.600	394.056	1.392.331	8.353.987
Controle de SO ₂	34.960.000	6.992.000	2.517.120	8.893.824	53.362.944
Captura de CO ₂	137.625.000	27.525.000	9.909.000	35.011.800	210.070.800
Torre de arrefecimento	9.916.000	1.983.200	713.952	2.522.630	15.135.782
Tratamento de água residual	7.204.000	1.440.800	518.688	1.832.698	10.996.186
Planta base	172.800.000	34.560.000	12.441.600	43.960.320	263.761.920
Total (US\$)	387.497.000	77.499.400	27.899.784	98.579.237	591.475.421
Total anualizado (US\$/ano)	34.420.364	6.884.073	2.478.266	8.756.541	52.539.244

OPEX_{fix}		OPEX_{var}	
Componente	Valor	Insumo	Valor
Operadores	1.006.450	Combustível	-
Supervisão	288.219	Água	32.235
Encargos de trabalho	618.513	Cal hidratada	465
Miscelânea	251.613	Descarte de resíduos	216.210
Manutenção	11.918.750	Reagentes químicos	13.390
Depreciação	12.916.567	Adsorvente	5.716.667
		Soda cáustica	120.500
Total (US\$/ano)	27.000.111	Total (US\$/ano)	6.099.466

Caso CCS ABS

CAPEX					
Itens	CPE	EPC	CProc	CProj	CTP
Controle de NOx na caldeira	1.479.000	295.800	106.488	376.258	2.257.546
Controle de NOx pós-combustão	23.190.000	4.638.000	1.669.680	5.899.536	35.397.216
Controle de mercúrio	-	-	-	-	-
Controle de material particulado	6.936.000	1.387.200	499.392	1.764.518	10.587.110
Controle de SO ₂	43.630.000	8.726.000	3.141.360	11.099.472	66.596.832
Captura de CO ₂	91.640.000	18.328.000	6.598.080	23.313.216	139.879.296
Torre de arrefecimento	9.351.000	1.870.200	673.272	2.378.894	14.273.366
Tratamento de água residual	7.517.000	1.503.400	541.224	1.912.325	11.473.949
Planta base	177.100.000	35.420.000	12.751.200	45.054.240	270.325.440
Total (US\$)	360.843.000	72.168.600	25.980.696	91.798.459	550.790.755
Total anualizado (US\$/ano)	32.052.758	6.410.552	2.307.799	8.154.222	48.925.329

OPEX_{fix}		OPEX_{var}	
Componente	Valor	Insumo	Valor
Operadores	1.062.600	Combustível	-
Supervisão	288.219	Água	570.385
Encargos de trabalho	646.588	Cal hidratada	416
Miscelânea	265.650	Descarte de resíduos	900.940
		Reagentes químicos	29.290
Manutenção	11.517.720	Adsorvente	3.291.000
		Soda cáustica	58.170
Depreciação	12.028.100	Inibidor de corrosão	658.200
		Carvão ativado	109.000
Total (US\$/ano)	25.808.877	Total (US\$/ano)	5.617.401

A3: Usina termelétrica a resíduo de eucalipto

Caso Sem CCS

CAPEX					
Itens	CPE	EPC	CProc	CProj	CTP
Controle de NOx na caldeira	1.479.000	295.800	106.488	376.258	2.257.546
Controle de NOx pós-combustão	14.780.000	2.956.000	1.064.160	3.760.032	22.560.192
Controle de mercúrio	-	-	-	-	-
Controle de material particulado	2.436.000	487.200	175.392	619.718	3.718.310
Controle de SO ₂	29.190.000	5.838.000	2.101.680	7.425.936	44.555.616
Captura de CO ₂	-	-	-	-	-
Torre de arrefecimento	5.265.000	1.053.000	379.080	1.339.416	8.036.496
Tratamento de água residual	5.768.000	1.153.600	415.296	1.467.379	8.804.275
Planta base	125.900.000	25.180.000	9.064.800	32.028.960	192.173.760
Total (US\$)	184.818.000	36.963.600	13.306.896	47.017.699	282.106.195
Total anualizado (US\$/ano)	16.416.909	3.283.382	1.182.017	4.176.462	25.058.769

OPEX_{fix}		OPEX_{var}	
Componente	Valor	Insumo	Valor
Operadores	972.500	Combustível	24.010.000
Supervisão	291.750	Água	473.847
Encargos de trabalho	602.950	Cal hidratada	194
Miscelânea	243.125	Descarte de resíduos	35.907
Manutenção	5.309.760	Reagentes químicos	10.080
Depreciação	6.160.600		
Total (US\$/ano)	13.580.685	Total (US\$/ano)	24.530.028

Caso CCS TSA

CAPEX					
Itens	CPE	EPC	CProc	CProj	CTP
Controle de NOx na caldeira	1.479.000	295.800	106.488	282.193	2.163.481
Controle de NOx pós-combustão	17.350.000	3.470.000	1.249.200	3.310.380	25.379.580
Controle de mercúrio	-	-	-	-	-
Controle de material particulado	2.707.000	541.400	194.904	516.496	3.959.800
Controle de SO ₂	32.490.000	6.498.000	2.339.280	6.199.092	47.526.372
Captura de CO ₂	146.100.000	29.220.000	10.519.200	27.875.880	213.715.080
Torre de arrefecimento	8.714.000	1.742.800	627.408	1.662.631	12.746.839
Tratamento de água residual	7.009.000	1.401.800	504.648	1.337.317	10.252.765
Planta base	142.400.000	28.480.000	10.252.800	27.169.920	208.302.720
Total (US\$)	358.249.000	71.649.800	25.793.928	68.353.909	524.046.637
Total anualizado (US\$/ano)	31.822.339	6.364.468	2.291.208	6.071.702	46.549.718

OPEX_{fix}		OPEX_{var}	
Componente	Valor	Insumo	Valor
Operadores	1.040.410	Combustível	30.270.000
Supervisão	291.750	Água	759.587
Encargos de trabalho	636.905	Cal hidratada	245
Miscelânea	260.103	Descarte de resíduos	45.260
Manutenção	11.222.930	Reagentes químicos	19.860
Depreciação	11.941.633	Adsorvente	9.555.556
		Soda cáustica	81.250
Total (US\$/ano)	25.393.731	Total (US\$/ano)	40.731.757

Caso CCS TSA otm

CAPEX					
Itens	CPE	EPC	CProc	CProj	CTP
Controle de NOx na caldeira	1.479.000	295.800	106.488	376.258	2.257.546
Controle de NOx pós-combustão	14.780.000	2.956.000	1.064.160	3.760.032	22.560.192
Controle de mercúrio	-	-	-	-	-
Controle de material particulado	2.436.000	487.200	175.392	619.718	3.718.310
Controle de SO ₂	29.160.000	5.832.000	2.099.520	7.418.304	44.509.824
Captura de CO ₂	125.438.000	25.087.600	9.031.536	31.911.427	191.468.563
Torre de arrefecimento	9.283.000	1.856.600	668.376	2.361.595	14.169.571
Tratamento de água residual	6.999.000	1.399.800	503.928	1.780.546	10.683.274
Planta base	140.700.000	28.140.000	10.130.400	35.794.080	214.764.480
Total (US\$)	330.275.000	66.055.000	23.779.800	84.021.960	504.131.760
Total anualizado (US\$/ano)	29.337.481	5.867.496	2.112.299	7.463.455	44.780.730

OPEX_{fix}		OPEX_{var}	
Componente	Valor	Insumo	Valor
Operadores	1.040.410	Combustível	24.010.000
Supervisão	291.750	Água	793.147
Encargos de trabalho	636.905	Cal hidratada	194
Miscelânea	260.103	Descarte de resíduos	35.907
Manutenção	10.309.720	Reagentes químicos	13.390
Depreciação	11.009.167	Adsorvente	7.583.333
		Soda cáustica	64.450
Total (US\$/ano)	23.548.054	Total (US\$/ano)	32.500.422

Caso CCS ABS

CAPEX					
Itens	CPE	EPC	CProc	CProj	CTP
Controle de NOx na caldeira	1.479.000	295.800	106.488	376.258	2.257.546
Controle de NOx pós-combustão	18.570.000	3.714.000	1.337.040	4.724.208	28.345.248
Controle de mercúrio	-	-	-	-	-
Controle de material particulado	2.836.000	567.200	204.192	721.478	4.328.870
Controle de SO ₂	36.450.000	7.290.000	2.624.400	9.272.880	55.637.280
Captura de CO ₂	81.030.000	16.206.000	5.834.160	20.614.032	123.684.192
Torre de arrefecimento	8.515.000	1.703.000	613.080	2.166.216	12.997.296
Tratamento de água residual	7.190.000	1.438.000	517.680	1.829.136	10.974.816
Planta base	150.200.000	30.040.000	10.814.400	38.210.880	229.265.280
Total (US\$)	306.270.000	61.254.000	22.051.440	77.915.088	467.490.528
Total anualizado (US\$/ano)	27.205.178	5.441.036	1.958.773	6.920.997	41.525.984

OPEX_{fix}		OPEX_{var}	
Componente	Valor	Insumo	Valor
Operadores	1.040.410	Combustível	33.360.000
Supervisão	291.750	Água	771.437
Encargos de trabalho	636.905	Cal hidratada	270
Miscelânea	260.103	Descarte de resíduos	783.260
		Reagentes químicos	18.090
Manutenção	9.701.820	Adsorvente	4.175.000
		Soda cáustica	79.510
Depreciação	10.209.000	Inibidor de corrosão	835.000
		Carvão ativado	141.200
Total (US\$/ano)	22.139.988	Total (US\$/ano)	40.163.767

Apêndice B: Aspectos técnicos e ambientais do carvão mineral

Este apêndice da tese apresenta elementos fundamentais de natureza técnica e ambiental sobre o carvão mineral enquanto recurso energético e a indústria carbonífera. Assim, serve de apoio para uma melhor compreensão do problema de fato abordado na tese.

B1: Carvão mineral e os recursos fósseis

Os recursos fósseis são formados pela decomposição incompleta da matéria orgânica abaixo do nível do solo ao longo de milênios. Tais recursos apresentam-se em três formas: gás natural, petróleo e carvão mineral. A característica comum desses é a predominância de cadeias de carbono em sua composição estrutural, sobretudo hidrocarbonetos, que os faz serem combustíveis na presença de atmosfera rica em oxigênio. O que distingue os combustíveis fósseis é essencialmente o estado físico em que se encontram na natureza: o carvão é sólido, o petróleo líquido e o gás natural é gasoso.

O estado físico da matéria é função das forças interativas entre suas partículas constituintes, sejam elas átomos, íons ou moléculas (CASTELLAN, 1983). Nesse sentido, pode-se entender que há um espectro de intensidade das interações presentes nos combustíveis fósseis, com o carvão de um lado e o gás natural do outro. As interações presentes no carvão são tipicamente ligações químicas fortes entre átomos de carbono em grandes estruturas amorfas (LEVINE; SCHLOSBERG; SILBERNAGEL, 1982). Enquanto isso, o gás natural é predominantemente formado por moléculas de gás metano (CH_4), que se ligam entre si por fracas interações intermoleculares do tipo Força de Van der Waals. Neste ponto, vale ressaltar que o metano é a molécula orgânica com maior razão possível entre o número de átomos de hidrogênio e de carbono. Portanto, é possível notar uma relação entre o estado físico dos combustíveis fósseis e os teores de carbono em sua estrutura.

Para além da separação fundamental entre os tipos de combustíveis fósseis, o teor de carbono também é uma grandeza fundamental para determinação da qualidade do carvão mineral. Trata-se de um parâmetro-chave na determinação do

chamado “rank” do carvão mineral, uma das formas de indicar sua qualidade enquanto recurso energético. O rank está associado às condições de formação do recurso, nomeadamente pressão, temperatura e, sobretudo, o tempo geológico de formação: em geral, quanto mais antiga a matéria orgânica original, maior o teor de carbono do carvão mineral e, conseqüentemente, maior o poder calorífico (CGEE, 2012; SCHWEINFURTH, 2009). A escala de rank dos carvões minerais divide-se em quatro grandes grupos, em ordem decrescente de teor de carbono: antracito, betuminoso, sub-betuminoso e linhito. Além do teor de carbono, a classificação do recurso carbonífero por rank também leva em consideração o teor de voláteis do carvão, conforme apresentado na Tabela B.1.

Tabela B.1. Classificação do carvão mineral conforme o rank

Classe	Grupo	Teor de carbono fixo (% p/p) ¹	Teor de voláteis (% p/p) ¹	Poder calorífico (MJ/kg) ²
Antracito	Meta-Antracito	> 98	< 2	
	Antracito	92 - 98	2 - 8	
	Semiantracito	80 - 92	8 - 14	
Carvão betuminoso	Carvão betuminoso de baixo teor de voláteis	78 - 86	14 - 22	
	Carvão betuminoso de médio teor de voláteis	69 - 78	22 - 31	
	Carvão betuminoso de alto teor de voláteis A	< 69	> 31	> 32,6
	Carvão betuminoso de alto teor de voláteis B			30,2 - 32,6
	Carvão betuminoso de alto teor de voláteis C			26,7 - 30,2
Carvão sub-betuminoso	Carvão sub-betuminoso A			24,4 - 26,7
	Carvão sub-betuminoso B			22,1 - 24,4
	Carvão sub-betuminoso C			19,3 - 22,1
Linhito	Linhito A			14,7 - 19,3
	Linhito B			< 14,7

Notas:

1 – Em base seca e livre de cinzas.

2 – Poder calorífico considerando a umidade do carvão no leito natural, sem a água visível na superfície.

Fonte: Adaptado de Hoffmann (2010).

Outro parâmetro-chave na determinação da qualidade do carvão mineral é o “grade”, que representa o teor de matéria orgânica sobre o conteúdo mássico total de uma amostra de carvão, que também inclui a fração inorgânica (HOFFMANN, 2010). Por ser um sólido mineral, o carvão é extraído das minas associado a outras substâncias minerais inorgânicas que, por não sofrerem combustão, restam sólidas após sua queima na forma de cinzas (SCHWEINFURTH, 2009). Portanto, no que

tange o *grade*, quanto menor for sua fração inorgânica, maior será a qualidade do carvão mineral enquanto recurso energético.

A cadeia produtiva do carvão mineral inicia-se na lavra, em que o recurso é extraído de sua jazida natural. Segue-se, então, à etapa de beneficiamento, que busca separar o material inerte e os contaminantes do carvão mineral, concentrando no recurso as substâncias de interesse. Na sequência, o carvão é transportado para o local em que haverá o consumo. Em geral, carvões de baixa qualidade são utilizados como combustível em usinas termelétricas comissionadas próximas ao sítio de mineração (“boca da mina”), pois não há viabilidade para custear seu transporte por longas distâncias (HOFFMANN, 2013). Já os carvões de qualidade superior podem ser encaminhados a transporte de longa distância, sobretudo quando são direcionados a aplicações industriais mais nobres que a geração termelétrica, como a siderurgia ou metalurgia (CGEE, 2012; EPE, 2016). Devido a suas características físicas, o carvão mineral produz impactos ambientais em todas as etapas de sua cadeia produtiva.

B2: Lavra e beneficiamento do carvão mineral

Há dois tipos de métodos para mineração de carvão: a mineração a céu aberto e a mineração subterrânea. O que determina o tipo de mineração a ser empregado são, essencialmente, a altura em que se encontra o recurso, dada pela geologia local, e a viabilidade econômica do processo extrativo (EPE, 2016). Depósitos rasos tendem a ser preferencialmente explorados por mineração a céu aberto, que em geral apresenta custos mais competitivos em relação ao processo subterrâneo (EPE, 2016).

Mineração a céu aberto

Na mineração a céu aberto, o carvão mineral é extraído da jazida pela superfície. O processo começa com a remoção cuidadosa do solo que cobre a camada de carvão, conhecido como material estéril, que é armazenado para uso futuro na reabilitação da área após a mineração. Após a remoção do solo, os extratos rochosos sobre o carvão são fragmentados, seja por perfuração controlada ou detonação. O material estéril fragmentado é carregado em caminhões de transporte e levado para áreas de deposição apropriadas. Em seguida, a camada de carvão é perfurada e detonada, com o objetivo de tornar o carvão mais acessível. O carvão é carregado em caminhões após a detonação e transportado para instalações de processamento ou distribuição em trens. Após a extração, medidas são tomadas para a recuperação ambiental da área, incluindo o preenchimento de áreas escavadas, plantio de vegetação e restauração das características naturais. Finalmente, após a reabilitação adequada e a conformidade com os regulamentos ambientais, a área é liberada para outros usos, como desenvolvimento urbano, agricultura ou conservação (EPE, 2016). A Figura B-1 apresenta uma esquematização do processo de mineração de carvão mineral a céu aberto.

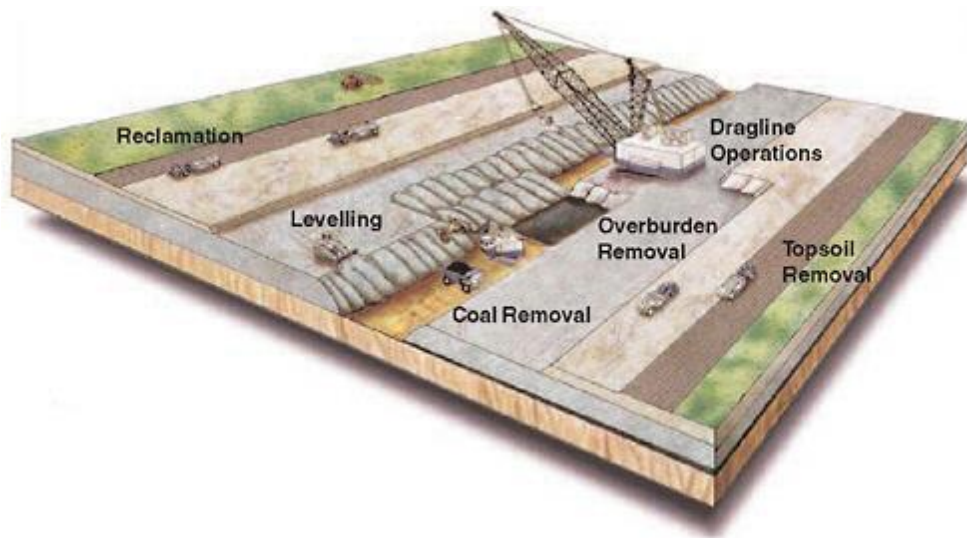


Figura B-1. Esquematização do processo de mineração a céu aberto

Fonte: EPE (2016)

Mineração subterrânea

A mineração subterrânea consiste na extração do carvão existente em camadas mais profundas por meio de escavações de galerias abaixo do nível da terra. Pode ser realizada por dois métodos, nomeadamente o de câmara e pilares (*room and pillar*) e o de frente larga (*longwall*). Os parâmetros que determinam a escolha do método de lavra subterrânea são a espessura, a profundidade e a inclinação da camada do recurso, tal como a quantidade de gás que há na via de carvão, no teto e no pavimento da galeria (EPE, 2016).

No método de câmara e pilares, são escavadas quatro ou mais entradas que dão acesso à frente de lavra. É utilizada uma máquina contínua para cortar o minério e carregar os veículos de transporte que levam o carvão bruto para fora da mina. Em intervalos estruturalmente adequados, são feitos cortes transversais para conectar as diferentes entradas da câmara, criando os pilares. O tamanho dos pilares é determinado pelo planejamento da lavra, particularmente sobre se haverá a recuperação do minério contido nos pilares. Caso essa recuperação não seja prevista, os pilares são dimensionados de forma a otimizar a extração de carvão, mantendo a segurança e estabilidade da câmara (NATIONAL ACADEMIES, 2018). A Figura B-2 apresenta uma esquematização da mineração de carvão subterrânea pelo método de câmara e pilares.

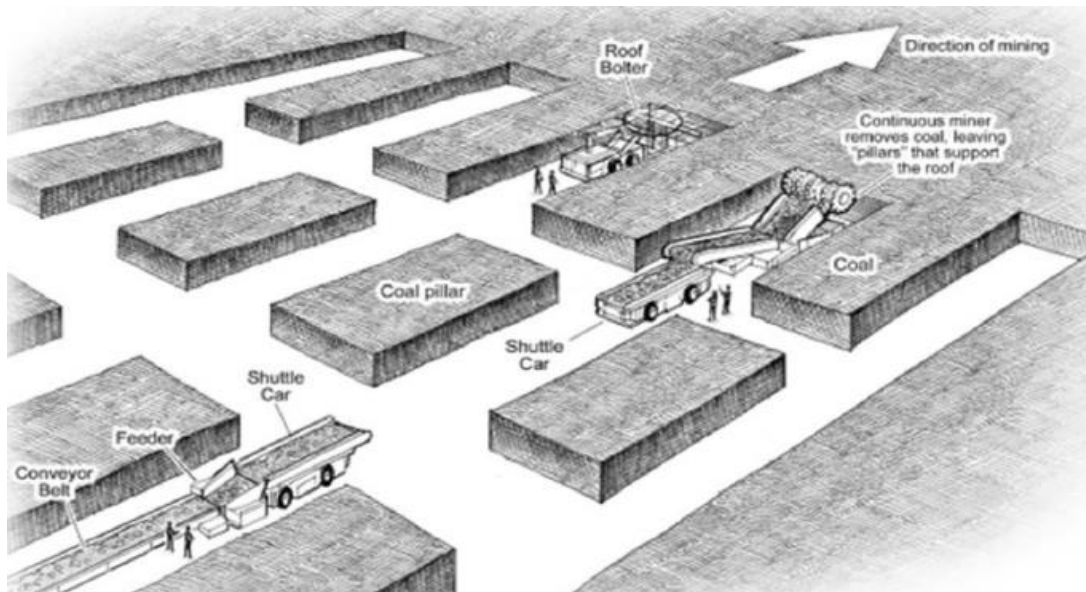


Figura B-2. Esquemática da mineração subterrânea pelo método de câmara e pilares

Fonte: National Academies (2018)

O método de frente larga consiste na passagem contínua de uma máquina de corte de alta potência (tosquiador) no sentido transversal à frente de lavra. O tosquiador corta a rocha de carvão exposta e passa o mineral cortado para um sistema de transporte por esteiras, que arrasta o carvão para fora da mina. Na área em que passa o tosquiador, o teto da mina é temporariamente suportado por equipamentos hidráulicos. À medida em que a frente de mineração prossegue, os equipamentos hidráulicos de suporte avançam, deixando desmoronar o teto das áreas em que o carvão foi extraído. Diferente do método de câmara e pilares, a frente larga não deixa pilares de carvão para suporte da mina, permitindo taxas de recuperação do recurso maiores, em geral. Contudo, o método de frente larga só é aplicável quando a camada de carvão é plana e uniforme (EPE, 2016; NATIONAL ACADEMIES, 2018). A Figura B-3 traz um esquema típico de mineração de frente larga.

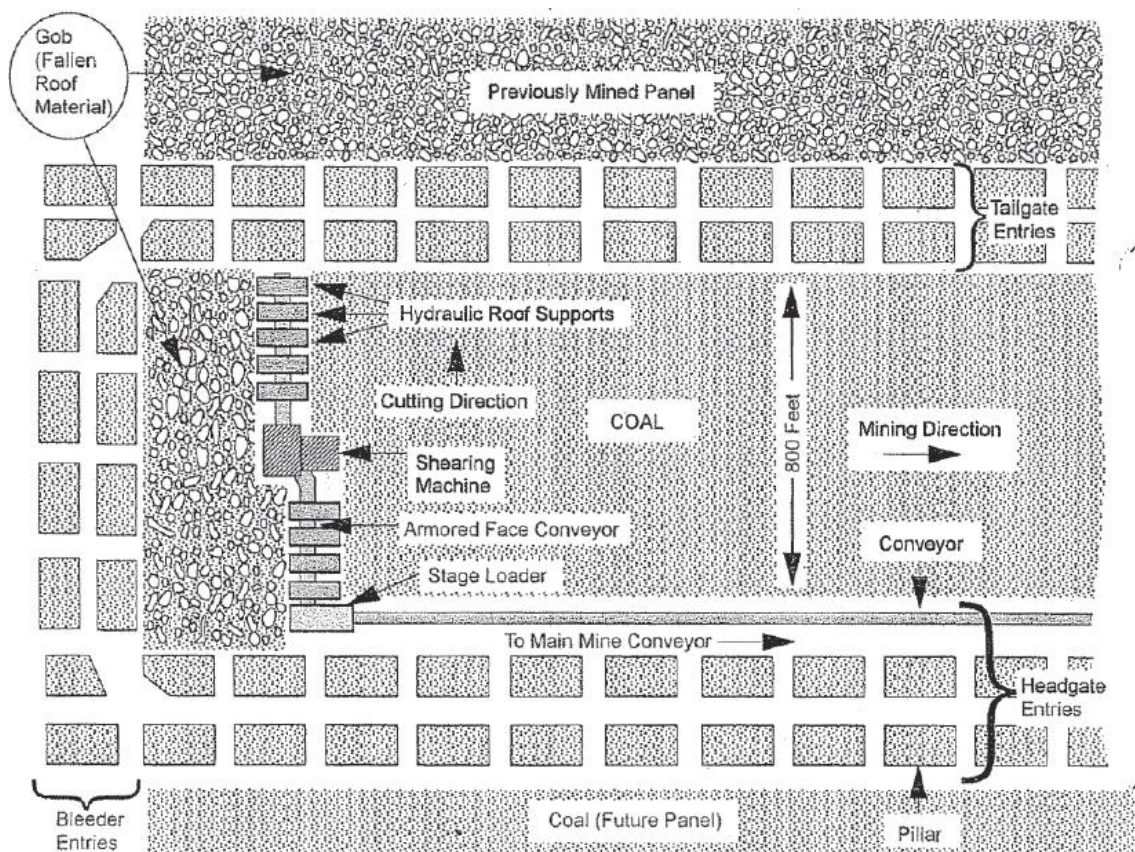


Figura B-3. Esquematização da mineração subterrânea pelo método de frente larga

Fonte: National Academies (2018)

Beneficiamento do minério de carvão

O beneficiamento consiste em um conjunto de processos físicos que visam melhorar a qualidade do carvão mineral enquanto recurso energético. Assim, os processos de beneficiamento têm por objetivo a separação de componentes inorgânicos do mineral ROM (*run-of-mine*), para concentrar sua fração combustível. De forma geral, o beneficiamento do carvão obedece às seguintes etapas sequenciais: cominuição; peneiramento; classificação; concentração; flotação; e desaguamento (EPE, 2016).

A cominuição é consiste nos processos de redução do tamanho de partícula do carvão mineral, visando aumentar sua superfície de contato para elevar sua reatividade com o oxigênio, melhorando seu desempenho como combustível. Os blocos de carvão desmontados da rocha na etapa da lavra são cominuídos primeiramente por britagem e, na sequência, por moagem, adquirindo um tamanho de partícula adequado às operações subsequentes (EPE, 2016).

O material moído é então peneirado e encaminhado à classificação, realizada geralmente por um hidrociclone. O objetivo dessas operações é separar as partículas do minério por tamanho. Após essa classificação, o carvão é concentrado em sua fração combustível por meio de processos de separação magnética e gravimétrica, que segregam os rejeitos por meio de suas propriedades magnéticas, condutividade elétrica e diferenças de densidades, formas e tamanhos (EPE, 2016).

Finalmente, as partículas minerais são conduzidas à flotação, sendo disposto em tanques com soluções aquosas, contendo agentes coletores e espumantes, e bolhas sendo geradas no fundo. Nele, ocorre uma separação seletiva das espécies minerais presentes, com base em suas propriedades de superfície. Os coletores fazem as partículas de carvão aderirem às bolhas e levitarem, ficando retidas na espuma formada na superfície do tanque. Assim, restam no fundo do tanque impurezas mais pesadas, como urânio, nióbio, ferro e metais pesados. O carvão concentrado é então encaminhado à secagem, enquanto o material separado no fundo do tanque segue para o desaguamento em barragens de rejeitos (EPE, 2016) .

A lavra de carvão mineral a céu aberto e subterrânea, junto ao beneficiamento do minério, apresentam diferentes tipos de impacto ambiental e desafios para sua mitigação. No caso da mineração a céu aberto, há um grande impacto visual causado pelas operações de lavra. A disposição inadequada do material estéril e dos rejeitos da mineração e do beneficiamento causa poluição, principalmente sobre os corpos hídricos locais, em virtude da geração de drenagem ácida de mina³⁵ (KOPPE; COSTA, 2008). A mitigação desses impactos requer um bom planejamento das operações de lavra, que deve incluir principalmente a recuperação da área atingida. As etapas sequenciais da recuperação são a reposição do material removido do corte primário, a cobertura com o solo original preservado, o controle da erosão e da acidez do solo e, finalmente, a revegetação da área (KOPPE; COSTA, 2008).

³⁵ Trata-se do produto da lixiviação de material ácido e metais pesados contidos nos rejeitos da mineração pela chuva, em geral, que é carreado para os corpos hídricos adjacentes, impactando sua biota.

A mineração subterrânea, por sua vez, gera menor impacto visual se comparada ao processo a céu aberto. Contudo, os problemas de poluição de corpos hídricos por drenagem ácida de mina persistem, quando há má disposição dos rejeitos da mineração e do beneficiamento do carvão. A má gestão das minas subterrâneas no período pós-exploração também leva à formação de drenagem ácida, devido à água que infiltra, lixivia os minerais expostos e chega aos corpos hídricos por meio de bocas de minas abandonadas³⁶ (GTA, 2007). Um problema ambiental característico de minas subterrâneas é a subsidência, que consiste no rebaixamento das terras superficiais sobre as quais ocorreram atividades de lavra. A subsidência pode ser deletéria para construções que, por motivos socioeconômicos ou de desconhecimento, são feitas em terrenos acima de antigos sítios de mineração, sendo um elemento de risco para sua estrutura. Por fim, outro problema típico da mineração de carvão subterrânea é o acúmulo de gases e poeira na atmosfera da mina, que são nocivos à saúde e segurança dos operadores das minas (KOPPE; COSTA, 2008; NATIONAL ACADEMIES, 2018).

³⁶ Bocas de minas abandonadas são as aberturas feitas nas minas para exploração e exploração de carvão com diferentes fins, como pesquisa, acesso e ventilação. Não confundir com “boca da mina”, expressão que faz referência ao aproveitamento de carvões de baixa qualidade em usinas termelétricas próximas aos sítios de mineração.

B3: Conversão termelétrica do carvão mineral

O aproveitamento do carvão mineral enquanto combustível para a geração termelétrica³⁷ pode ser realizado a partir de três grupos de tecnologias, listadas na sequência em ordem crescente de nível de sofisticação tecnológica (EPE, 2016):

- (i) Combustão de carvão pulverizado (PCC, do inglês *Pulverized Coal Combustion*);
- (ii) Combustão em leito fluidizado (FBC, do inglês *Fluidized Bed Combustion*)
- (iii) Gasificação integrada com Ciclo Combinado (IGCC, do inglês *Integrated Gasification Combined Cycle*).

A eficiência dos processos de conversão termelétrica do carvão mineral está associada tanto ao tipo de processo, quanto às condições operacionais da planta. Os parâmetros-chave de operação são a temperatura e a pressão do vapor que é gerado na caldeira, que pode estar em condição subcrítica ou supercrítica. Termodinamicamente, *ceteris paribus*, quanto maiores forem os valores de temperatura e pressão, maior é a eficiência da conversão da energia térmica em energia elétrica. Contudo, quanto mais extremos são os valores das variáveis de processo, mais complexos tornam-se o projeto, a construção e operação das plantas (EPE, 2016; ROCHEDO, 2011). Nesse sentido, as plantas termelétricas a carvão são classificadas com base nas condições operacionais do vapor, conforme apresentado na Tabela B.2.

³⁷ Além da geração termelétrica, caso sua qualidade assim permita, o carvão pode também ser convertido a coque para utilização como agente redutor nos processos das cadeias de produção da metalurgia e siderurgia. Contudo, tal aplicação para o carvão mineral não é explorada no escopo do presente trabalho, visto que (i) se trata de uma cadeia menos ameaçada pela descarbonização e (ii) a produção de carvão mineral atualmente no Brasil é praticamente toda direcionada para a geração termelétrica.

Tabela B.2. Tipos de plantas termelétricas a carvão mineral

Parâmetros	Plantas Sub-Críticas	Plantas Supercríticas	Plantas Ultra-Supercríticas
Pressão (bar)	150 a 180	> 245	> 260
Temperatura (°C)	540 a 565	540 a 570	> 600
Restrição	Tolera carvão de alto teor de cinza	Em desenvolvimento para carvões de alto teor de cinza	Apenas para carvões de baixo teor de cinza
Eficiência	30 a 40%	40 a 46%	> 48%

Fonte: Adaptado de ABCM (2015) *apud* EPE (2016)

Combustão de carvão pulverizado (PCC)

A tecnologia PCC é a mais comum para plantas termelétricas, constituindo cerca de 90% das unidades de geração a carvão do mundo. Após beneficiado, o carvão é pulverizado e admitido pneumáticamente na caldeira. A queima se dá com ar de combustão (primário) através de uma série de bicos queimadores, a temperaturas de 1300 a 1500°C e com baixo tempo de residência do combustível na caldeira (normalmente de 2 a 5 segundos). Para aumentar a qualidade da queima, é usado ainda ar secundário e em alguns casos, ar terciário. A tecnologia PCC é usada com uma variedade de tipos de carvão, contudo pode haver restrições para carvões com alto teor de cinzas (EPE, 2016).

As caldeiras PCC são comumente operadas com o chamado "fundo seco," onde a maioria das cinzas é arrastada pelos gases de combustão, exigindo sistemas eficientes de limpeza de gases. Essas caldeiras são dimensionadas para coincidir com as escalas das turbinas a vapor, com saídas que variam de 50 a 1300 MW, sendo que a maior parte das unidades em operação tem potências na ordem de 300 MW. A queima pulverizada de carvão é altamente eficiente, atingindo 99% de eficiência na combustão. Pode também atingir altos patamares de eficiência de conversão de energia térmica em elétrica, sobretudo em plantas com ciclo a vapor supercrítico (EPE, 2016).

Combustão em leito fluidizado

Na tecnologia FBC, o carvão moído é inserido no leito do reator imiscuído com partículas sólidas não combustíveis. O ar de combustão é então soprado ao fundo do reator, arrastando as partículas ao longo do vaso, o que confere um aspecto de fluido ao leito de partículas sólidas. Em contato com o oxigênio do ar, as partículas de carvão no leito sofrem a combustão, formando um gás exausto que ascende para o topo do reator, que conta com um sistema de ciclones para devolver as partículas sólidas ascendentes a seu leito. Com isso, a tecnologia FBC proporciona tempos maiores de residência do carvão no leito, o que permite que uma queima mais uniforme e em temperaturas na faixa de 800 a 900 °C, ou seja, mais baixas do que na PCC, o que é importante para reduzir as emissões de NO_x³⁸. Entretanto, as perdas térmicas que ocorrem no ciclone leva a uma redução da eficiência de conversão termelétrica do processo FBC em comparação ao PCC (EPE, 2016).

A parte combustível do carvão mineral compõe uma parte minoritária do leito fluidizado na FBC, de aproximadamente 5%. O restante do leito é composto principalmente por material inerte, como areia e as cinzas do carvão. Também é possível utilizar calcário na mistura sólida do leito, que pode reagir com componentes inorgânicos ácidos do carvão e evitar emissões de poluentes atmosféricos³⁸. Com isso, a tecnologia FBC adequa-se bem à queima de carvões com alto teor de cinzas, uma vez que essas acabam por integrar o leito (CGEE, 2012).

Há dois tipos básicos de reatores para queima em leito fluidizado, que são o leito borbulhante (CFB, do inglês *Bubbling Fluidized Bed*) e o circulante (CFB, do inglês *Circulating Fluidized Bed*). A diferença entre esses dois tipos de design está nas velocidades do gás, que influenciam o regime de fluidização do leito. O BFB utiliza velocidades mais baixas, permitindo a verificação de uma superfície no leito com aspecto borbulhante, como um fluido em ebulição. Já o CFB trabalha com velocidades de gás mais altas, levando ao arraste de parte das partículas pelo topo do leito, onde é separado do gás exausto pelo ciclone e retorna ao leito (HOFFMANN, 2013).

³⁸ Mais detalhes sobre poluição atmosférica por gases ácidos são fornecidos no Anexo B4.

A tecnologia BFB é limitada em termos de escalabilidade, devido à dificuldade em manter a fluidização uniforme do leito à medida que o tamanho da área transversal aumenta. Assim, plantas de escala maior necessitam utilizar o design CFB, em que o arraste de partículas do leito não representa um problema. A BFB é principalmente usada em unidades de até 50 MW, enquanto a CFB é empregada em unidades maiores, geralmente até 300 MW de eletricidade (HOFFMANN, 2013).

Gasificação integrada com ciclo combinado

A tecnologia IGCC incorpora dois sistemas tecnológicos independentes: a gasificação de combustíveis e a geração termelétrica de ciclo combinado. A gasificação de combustíveis, nesse caso do carvão, é um processo de oxidação parcial do combustível, que forma o chamado “gás de síntese”, uma mistura de H_2 e CO. Essa oxidação parcial é feita geralmente com ar enriquecido em oxigênio ou oxigênio puro, em razão estequiométrica O_2 /carvão cerca de quatro vezes inferior à requerida para a combustão completa (ROCHEDO, 2011). O gás de síntese gerado é um vetor energético secundário, que pode ser direcionado para diferentes aplicações, quais sejam a formulação de produtos químicos e combustíveis sintéticos, a provisão de hidrogênio para fins diversos ou a combustão para geração de energia térmica e elétrica (AIL; DASAPPA, 2016; CORMOS, 2012; MILANI; SZKLO; HOFFMANN, 2017; NREL, 2012; ROCHEDO, 2011; TAGOMORI, 2017). No caso do IGCC, o gás de síntese é encaminhado à geração elétrica em sistema de ciclo combinado.

O ciclo combinado para geração termelétrica representa o acoplamento de dois ciclos termodinâmicos, de forma a majorar a eficiência de recuperação energética dos combustíveis. No primeiro e principal estágio, em que mais de 60% da eletricidade é gerada, o combustível gasoso (no caso, o gás de síntese) é queimado, adquirindo alta temperatura e pressão, sendo encaminhado a uma turbina a gás (ciclo Brayton). Após essa primeira passagem, o gás exausto da turbina, ainda quente, é encaminhado a um trocador de calor, servindo como fonte térmica para um ciclo termodinâmico secundário a vapor (ciclo Rankine) (EPE, 2016; HOFFMANN, 2010). A Figura B-4 apresenta um fluxograma esquemático dos processos envolvidos na tecnologia IGCC.

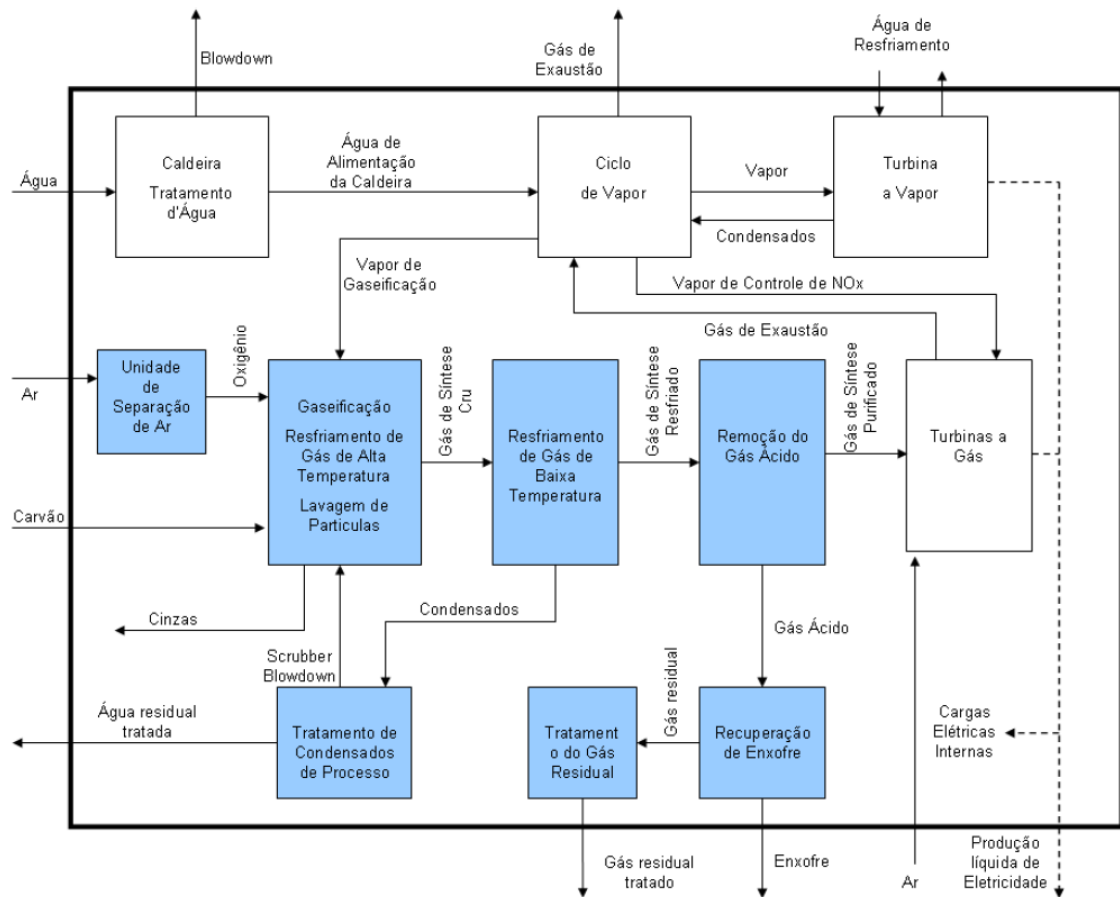


Figura B-4. Fluxograma esquemático do processo IGCC

Fonte: Hoffmann (2010)

De acordo com Hoffmann (2010), a tecnologia IGCC é complexa e não compete com as demais formas de geração termelétrica em custos. Sua vantagem, contudo, é a obtenção de uma corrente mais concentrada de CO₂ após a gasificação, o que pode facilitar o controle das emissões do gás no processo.

B4: Queima do carvão mineral e poluição atmosférica

Os principais impactos ambientais associados à cadeia do carvão mineral estão associados à emissão de poluentes atmosféricos decorrente de sua combustão. Poluentes atmosféricos são qualquer forma de matéria ou energia que impactam a qualidade do ar, tornando-o nocivo à saúde dos seres vivos, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais ou prejudicial à segurança, uso e gozo da propriedade (MMA, 2021).

A complexa mistura de substâncias que formam o combustível sólido mineral gera um gás de combustão heterogêneo, contendo compostos que poluem o meio ambiente e prejudicam a saúde humana. Além disso, o próprio estado físico sólido do carvão mineral dificulta o contato superficial do carbono com o oxigênio do ar, aumentando a chance de geração de produtos incompletos na combustão que são poluentes atmosféricos (particularmente C e CO, ao invés de CO₂). Além de gerar os poluentes, a combustão incompleta ainda reduz o potencial de conversão da energia química do combustível em energia térmica, diminuindo a eficiência dos processos de aproveitamento energético do combustível.

Dentre as diversas substâncias poluentes da atmosfera que são geradas a partir da queima do carvão mineral, é possível destacar alguns grupos de poluentes que, historicamente, motivaram movimentos socioambientais de contestação sobre o uso de carvão mineral. São eles: (i) os materiais particulados; (ii) os óxidos de enxofre e nitrogênio; e (iii) os poluentes climáticos. Nas subseções a seguir, para cada um desses grupos de poluentes são apresentadas brevemente definições, incluindo seus principais efeitos e fontes de emissão na indústria do carvão, e estratégias de controle de emissões associadas. Além disso, busca-se trazer um exemplo histórico ilustrativo de pressões socioambientais clássicas sobre a indústria carbonífera oriunda de cada uma das tipologias de poluentes atmosféricos apresentadas.

Material particulado: o problema da fumaça

Definições

Denomina-se material particulado (PM, do inglês *particulate matter*) a mistura de sólidos de pequenos diâmetros que é lançada em suspensão por um fluxo gasoso,

por exemplo como poeiras ou fumaças (MMA, 2021). O PM é classificado pelo diâmetro das partículas, seguindo a notação PM_x , em que x é o diâmetro médio limite da classe de PM referida, expresso em micrômetros (μm). Os valores de x variam de 10, que engloba toda a classe de material particulado, a 0.1, que considera apenas as partículas ultrafinas (IMPÉRIO, 2020). O impacto do material particulado sobre a saúde humana associa-se ao diretamente ao tamanho médio das partículas, pois este determina em que parte do sistema respiratório as partículas podem se alojar. No caso de particulados de maior diâmetro (PM_{10}), as partículas alcançam as vias aéreas superiores, podendo agravar quadros respiratórios como a asma. Já partículas finas ($PM_{2.5}$) podem se difundir em nível alveolar, podendo causar problemas mais graves, como doenças mutagênicas e mortes prematuras (IMPÉRIO, 2020). Além de danos à saúde, a alta concentração de material particulado também provoca transtornos ao bem-estar social, como a redução da visibilidade na atmosfera (OLIVEIRA, E. A. DE, 2009).

A geração de material particulado na cadeia produtiva do carvão mineral também ocorre nas atividades associadas à lavra e beneficiamento, nas operações associadas à fratura das partículas minerais (MONCIOSO, 2019). Nessas operações, são formadas em geral partículas mais grossas (PM_{10}). Essas partículas impactam principalmente a saúde dos trabalhadores nos sítios de mineração, uma vez geralmente os locais de mineração ficam longe de zonas residenciais (NATIONAL ACADEMIES, 2018).

A combustão gera material particulado composto principalmente de cinzas leves (volantes) e de fuligem, que é proveniente da queima incompleta do combustível. Os gases exaustos da queima carregam o material particulado na forma de fumaça, lançando-o em suspensão na atmosfera. Em geral, o material particulado oriundo da combustão apresenta partículas de menor diâmetro ($PM_{2.5}$). Além das partículas emitidas na fumaça, a má gestão das cinzas resultantes da queima do carvão também provoca a emissão de material particulado. Por exemplo, a ação do vento sobre grandes depósitos de cinzas na forma de pilhas a céu aberto pode emitir uma grande quantidade de material particulado. Como os centros de consumo de combustíveis (como indústrias, usinas termelétricas e fornos domésticos) ficam

usualmente próximos a áreas habitadas, a emissão de material particulado pela combustão do carvão normalmente expõe a riscos de saúde não somente os usuários do combustível, como também a população em seu entorno (MMA, 2021; OLIVEIRA, E. A. DE, 2009).

Controle de emissões

O controle da emissão de material particulado nas etapas de lavra e beneficiamento do carvão mineral geralmente é feito a partir de uma abordagem nos quatro níveis hierárquicos clássicos da segurança do trabalho: (i) prevenção da formação; (ii) controles de engenharia; (iii) controles administrativos; e (iv) medidas de proteção pessoal (NATIONAL ACADEMIES, 2018). A prevenção da formação é feita pelo design dos equipamentos de lavra e beneficiamento, enquanto os controles administrativos buscam evitar o contato dos trabalhadores com o material particulado e as medidas de proteção pessoal incluem o uso de equipamentos de proteção individual e coletiva pelos operadores (NATIONAL ACADEMIES, 2018). Os controles de engenharia, por sua vez, são feitos principalmente pelo uso de equipamentos supressores de poeira, que pulverizam água para remover as partículas das nuvens de poeira (MONCIOSO, 2019). No caso de mineração subterrânea, a ventilação mecânica também presta um importante papel no controle de material particulado (NATIONAL ACADEMIES, 2018).

O controle das emissões de material particulado oriunda da combustão é feito por equipamentos capazes de remover as partículas sólidas da corrente de gás exausto da combustão, antes de liberá-lo para a atmosfera. Algumas tecnologias prestam-se a esse serviço, das quais se destacam os ciclones, os precipitadores eletrostáticos e os filtros de mangas (BERKENPAS *et al.*, 2018; IMPÉRIO, 2020; VISCONDI; SILVA; CUNHA, 2016).

Os ciclones são equipamentos aerodinamicamente projetados para forçar a corrente gasosa por uma trajetória circular, causando uma força centrípeta sobre as partículas sólidas que as faz colidir contra suas paredes e caírem. Com isso, o gás segue sua trajetória ascendente, enquanto parte das partículas sólidas restam separadas nos coletores dos ciclones. Pelo seu princípio de funcionamento, os ciclones são apropriados para coletar partículas maiores (PM₁₀), podendo operar em

temperaturas de até 1.000°C com um relativo baixo custo (IMPÉRIO, 2020). Contudo, os ciclones por si só não possuem uma eficiência de remoção suficiente para remover as partículas de maneira a cumprir com as regulações de qualidade do ar, sendo usualmente empregados como pré-separadores em usinas termelétricas a carvão, que utilizam outros equipamentos de maior eficácia a jusante (VISCONDI; SILVA; CUNHA, 2016).

Precipitadores eletrostáticos geram um campo elétrico intenso sobre o gás de combustão, que eletriza as partículas sólidas em suspensão. Então, ao adquirirem carga, as partículas são atraídas e coletadas nas placas eletrificadas com carga oposta. Uma limpeza periódica nas placas do precipitador é necessária para manter a eficiência da coleta de material particulado, podendo ser feita a seco ou por lavagem (VISCONDI; SILVA; CUNHA, 2016). Altas temperaturas tendem a ter um efeito negativo sobre a eficiência dos precipitadores eletrostáticos, uma vez que aumentam a resistividade das partículas, reduzindo sua capacidade de eletrização (OZAWA, 2003). Atualmente, precipitadores eletrostáticos operam em temperatura de até 400°C (IMPÉRIO, 2020).

Filtros de manga consistem em membranas coletoras pelas quais o gás de combustão percola, restando retido o material particulado. Os filtros podem ser constituídos de diversos materiais, como tecido de algodão, papel ou poliéster (VISCONDI; SILVA; CUNHA, 2016). A restrição do uso de filtro de mangas está no limite relativamente baixo da temperatura de operação, que está associado ao tipo de material empregado, mas em geral não deve ultrapassar a faixa de 250 °C (IMPÉRIO, 2020). A substituição ou limpeza periódica dos filtros deve ser realizada para evitar sua saturação, que pode levar à oclusão da passagem do gás. A remoção do material retido pode ser feita pela passagem de uma corrente de ar no sentido reverso do fluxo gasoso normal (VISCONDI; SILVA; CUNHA, 2016).

Movimento antifumaça, Grande Nevoeiro de Londres e o Clean Air Act de 1956

A fumaça gerada pela combustão está por trás das primeiras pressões socioambientais sobre a queima indiscriminada de carvão mineral no berço da indústria carbonífera global, o Reino Unido. No fim do século XIX, na era vitoriana, reformadores preocupados com os efeitos prejudiciais da fumaça na saúde, nas

condições de vida e na sociedade promoveram movimentos de combate à fumaça, redefinindo-a como uma ameaça à saúde pública (TURNHEIM, 2012).

Ao longo da primeira metade do século XX, o movimento seguiu exercendo pressões pela redução das emissões de fumaça, por meio de diferentes estratégias ao longo do tempo. Inicialmente, buscaram a conscientização dos usuários sobre o problema da fumaça, já que havia a percepção da fumaça das chaminés e da atmosfera poluída dos centros industriais como um mero transtorno, ou o preço a pagar por progresso, prosperidade e emprego.

Entre as décadas de 1910 e 1920, o movimento tornou-se uma coalizão, com a adesão de grupos profissionais de médicos e engenheiros. Com essa profissionalização, a coalizão buscou contemporizar seus objetivos com a indústria, pela busca de soluções tecnológicas que pudessem promover uma relação ganha-ganha, com a redução da fumaça aliada à economia de combustíveis. A coalizão foi convidada a contribuir em 1921 com um novo *Public Health Act*. Porém o lobby da Federação das Indústrias Britânicas atuou no sentido de seu enfraquecimento, tendo como resultado a promulgação de um *Public Health Act* em 1926 considerado fraco pelos membros da coalizão. A partir daí, os ativistas mudam o foco de suas ações, iniciando um movimento pela deslegitimação do carvão mineral enquanto combustível de uso doméstico.

Assim, na década de 1930 emerge uma narrativa cultural mais ampla de modernidade, conveniência, limpeza e saúde, promovida pelas indústrias de gás e eletricidade, que passa a retratar o carvão como combustível antiquado, sujo e prejudicial à saúde. Como resposta, a indústria carbonífera buscou esforços para melhorar a reputação do carvão, argumentando que era um combustível moderno que podia ser usado em aparelhos atualizados que produziam menos ou nenhuma fumaça (TURNHEIM, 2012; TURNHEIM; GEELS, 2012).

O acúmulo de tensões entre a indústria carbonífera britânica e os movimentos antifumaça tem seu apogeu na década de 1950, quando da ocorrência do evento conhecido como O Grande Nevoeiro de Londres de 1952. O evento decorreu da chegada de uma forte massa de ar frio na cidade no início do mês de dezembro. Por

um lado, houve um forte aumento do consumo de carvão na cidade para lidar com o frio, particularmente de carvão de baixo custo, rico em enxofre. Por outro lado, a densa massa de ar frio prejudicou a dispersão da fumaça, levando a um aumento de sua concentração na atmosfera local (POLIVKA, 2018).

O Grande Nevoeiro gerou fortes transtornos para a cidade. A visibilidade ficou tão prejudicada que houve relatos de muitas colisões de pássaros em edifícios e no aeroporto local não se via além de 10 metros. Houve registros de diversas interrupções no transporte público, acidentes de carro e dificuldades para pedestres, incluindo afogamentos no rio Tâmis decorrentes de quedas de transeuntes pelas margens. Até mesmo os sistemas de educação e saúde foram prejudicados, com a ausência de crianças na escola e a sobrecarga nos hospitais e ambulâncias (DAVIS; BELL; FLETCHER, 2002; POLIVKA, 2018; ZHANG, J. J.; SAMET, 2015). Contudo, o efeito mais nocivo do evento foi no aumento sem precedentes no número de mortes em excesso na cidade, com estimativas iniciais de 4 mil (LOGAN, 1953), mas com evidências de que o valor real pode ter sido de até 12 mil no período (DAVIS; BELL; FLETCHER, 2002; POLIVKA, 2018).

O episódio do Grande Nevoeiro causou choque na população, alçando o problema da fumaça à prioridade máxima na agenda política local. Isso levou as autoridades finalmente à ação incisiva contra a emissão de poluentes atmosféricos, com a promulgação do *Clean Air Act* (CAA) de 1956. Dentre o conjunto de medidas do CAA, foram implementadas restrições ao uso de carvão mineral em residências e a permissão para o estabelecimento de áreas livres de fumaça pelas autoridades municipais, além da provisão de subsídios para conversão de fornos domésticos para a queima de combustíveis não emissores de fumaça (TURNHEIM, 2012).

A implantação do CAA de 1956 teve grande efeito sobre o consumo residencial de carvão mineral, sobretudo pelo forte uso da prerrogativa de criação de zonas livres de fumaça: 1970 as proibições de emissões de fumaça já cobriam 5 milhões de estabelecimentos (TURNHEIM; GEELS, 2012). Assim, somado à emergência de outros vetores energéticos alternativos, particularmente o óleo combustível, o gás natural e a eletricidade, o CAA de 1956 pressionou fortemente uso residencial de carvão mineral (TURNHEIM, 2012).

Óxidos de enxofre e nitrogênio: o problema da chuva ácida

Definições

Os óxidos de nitrogênio (NO_x) e de enxofre (SO_x) são formados pela reação do oxigênio com os respectivos ametais (oxidação). O sufixo “x” da notação indica que, para ambos os elementos, diferentes estados de oxidação formam mais de um tipo de poluente atmosférico. No caso do nitrogênio, são poluentes atmosféricos o óxido nítrico (NO) e o óxido nitroso (NO_2). Para o enxofre, a qualidade do ar é comprometida principalmente pelo dióxido de enxofre (SO_2) e o trióxido de enxofre (SO_3) (EPA, 1999; IMPÉRIO, 2020).

O NO_x se forma em processos de combustão a partir de dois mecanismos. O primeiro, denominado NO_x de combustível, dá-se pela presença de átomos de nitrogênio combinados na estrutura do combustível, particularmente no carvão mineral. Nesse caso, a combustão faz com que o nitrogênio reaja quimicamente com o oxigênio, produzindo as espécies oxidadas (NO_x). O outro mecanismo de geração é conhecido como NO_x térmico, que ocorre por meio da oxidação do nitrogênio (N_2) do ar em altas temperaturas. O N_2 compõe cerca de 80% do ar atmosférico, sendo oxidado a NO_x em temperaturas superiores a 1.300°C (EPA, 1999). No caso de SO_x , a formação dá-se unicamente pela presença de enxofre na composição do combustível. Havendo a combustão, o enxofre é oxidado, formando predominantemente SO_2 (cerca de 95%) e SO_3 , em menor medida (IMPÉRIO, 2020; VERGNHANINI FILHO, 2020).

A presença de NO_x e SO_x afeta a qualidade do ar per se, uma vez que os óxidos de nitrogênio e enxofre são prejudiciais à saúde humana. A exposição a altos níveis desses poluentes pode causar problemas cardiorrespiratórios e agravar casos de alergias (MMA, 2021). Contudo, para além de poluente primário, o NO_x é precursor de formas secundárias de poluição atmosférica. Uma delas é a formação de ozônio na troposfera, que é a camada mais baixa da atmosfera, onde estão os seres vivos. O alto poder oxidante do ozônio tem o potencial de agravar quadros cardiorrespiratórios, sobretudo em crianças e idosos, além de afetar a vegetação e os ecossistemas (EPA 1999; IMPÉRIO, 2020). Outro tipo de poluição secundária causada por NO_x é a formação de smog fotoquímico, uma neblina esbranquiçada

que prejudica a qualidade do ar e causa irritação nos olhos, nariz e garganta (EPA, 1999). Nesse sentido, o NO_x reage fotoquimicamente com compostos orgânicos voláteis, favorecendo a formação do smog (VERGNHANINI, 2016).

Para além desses poluentes, em contato com a umidade do ar os óxidos de nitrogênio e enxofre produzem o fenômeno da chuva ácida. A chuva ácida causa uma série de problemas ambientais, tais como a acidificação do solo e dos corpos hídricos e danos em plantas, podendo afetar tanto a agricultura como áreas de vegetação natural. Mesmo edifícios, monumentos históricos e a infraestrutura das cidades podem ser danificados pela chuva ácida, dado seu caráter corrosivo (EPA, 1999; IMPÉRIO, 2020; MMA, 2021; TURNHEIM, 2012; VERGNHANINI FILHO, 2020).

Controle de emissões

O controle das emissões de NO_x e SO_x proveniente da queima de carvão mineral passa pelo uso de diversos equipamentos e estratégias de engenharia acoplados ao sistema de combustão.

Para controlar a emissão de NO_x , o foco das estratégias está sobre a redução das emissões de NO_x térmico. Para tanto, pode-se atuar sobre os dispositivos de queima de combustível, reduzindo a geração do NO_x , ou sobre o gás exausto, convertendo o NO_x gerado a nitrogênio molecular. Considerando essas duas estratégias, Império (2020) lista os principais métodos para controle de emissão de NO_x listados na sequência:

- Queimadores de baixo NO_x : o princípio desses queimadores é o de segregar a combustão em etapas, de forma que a reduzir a temperatura da queima em relação ao processo com chama única. Para tanto, o ar é adicionado em estágios na câmara de combustão, o que reduz o contato ar/combustível por estágio, retardando a formação do NO_x .
- Requeima: parte de um princípio similar aos queimadores de baixo NO_x , no sentido de segregar o processo de combustão em estágios, porém sua lógica de operação passa pela injeção escalonada de combustível na câmara de combustão. Com isso, o NO_x é gerado no primeiro estágio, onde se queima a maior parte do

combustível em um ambiente oxidante. O gás então avança ao estágio seguinte, onde o restante do combustível é injetado em um ambiente redutor, favorecendo a oxidação dos radicais do combustível e a redução do NO_x a N_2 . Por fim, há um terceiro estágio com injeção de ar para queimar completamente o combustível.

- Recirculação de gases da combustão: nessa estratégia, o gás de combustão rico em NO_x é recirculado para a zona de chama primária, de forma a diluir a mistura de oxigênio e combustível. Isso reduz a temperatura e a concentração de O_2 da queima, desfavorecendo a formação de NO_x .
- Oxicombustão: a oxicombustão é uma técnica que utiliza oxigênio puro ou ar com alto teor de oxigênio para queimar os combustíveis, ao invés do ar atmosférico. Como a presença de N_2 passa a ser menor ou inexistente no comburente, a técnica desfavorece sua oxidação térmica para formação de NO_x .
- Combustão em leito fluidizado: a queima de combustível em leito fluidizado promove um contato melhorado entre as partículas de combustível sólido com o ar em relação ao leito fixo. Isso facilita o controle da temperatura da queima, possibilitando uma redução da formação de NO_x .
- Redução catalítica seletiva (SCR): trata-se de uma estratégia de controle pós-combustão, em que um agente redutor é posto em contato com o gás exausto na presença de catalisador, visando a redução do NO_x a N_2 . Os principais agentes redutores empregados são o hidróxido de amônio e a ureia, na forma de soluções aquosas. A catálise é promovida em geral por óxido de titânio, podendo também serem usados óxidos de vanádio, tungstênio, molibdênio, níquel e cromo.
- Redução seletiva não-catalítica (SNCR): similar à técnica SCR, porém sem o uso de catalisadores, operando em temperaturas mais elevadas.

O controle de SO_x pode ser realizado por três estratégias básicas, que atuam sobre diferentes elementos do processo: combustível, combustão e gás exausto. As técnicas que atuam sobre o combustível visam a remoção de seu teor de enxofre antes da combustão. Contudo, nem sempre são tecnicamente possíveis ou comercialmente viáveis (VERGNHANINI FILHO, 2020).

A atuação sobre a combustão é uma estratégia aplicável a processos de queima de combustível em leito fluidizado. Trata-se da adição de dolomita (carbonato de cálcio ou magnésio) ao leito fluidizado, visando sua reação com as moléculas ácidas de SO_x produzidas na combustão do carvão. A reação gera sais de enxofre sólidos, que podem ser removidos no fundo do leito (VERGNHANINI FILHO, 2020).

Por fim, as técnicas mais importantes de controle de SO_x são as de dessulfuração do gás exausto, mais conhecidas por sua sigla FGD (do inglês, *Flue Gas Desulfurization*). Trata-se de um processo de reação entre o gás da combustão e um adsorvente, que remove seletivamente o SO_x , convertendo-o em um subproduto sólido ou líquido. O subproduto obtido pode ser sólido ou líquido, o que determinará a denominação do processo de dessulfuração como seco ou úmido, respectivamente. Comumente, o gás da combustão reage com uma solução aquosa de calcário, gerando gesso como subproduto final (IMPÉRIO, 2020).

O problema da chuva ácida na Europa

O problema da chuva ácida entrou em debate na agenda ambiental global na década de 1970. Até então, a preocupação com a poluição atmosférica causada pelo carvão mineral restringia-se ao problema da fumaça, sendo vista como uma questão doméstica, cujos efeitos nocivos eram sentidos dentro de um limite geográfico praticamente restrito às áreas onde havia a emissão. Contudo, a questão da chuva ácida trouxe um novo elemento de complexidade à governança ambiental: o problema da poluição transfronteiriça (LONGHURST *et al.*, 1995; TURNHEIM, 2012).

A Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano de 1972, realizada em Estocolmo, foi o marco inicial das discussões internacionais sobre poluição atmosférica enquanto um problema global, orientando a entrada dessa

questão na agenda política de muitos países, particularmente na Europa. Na conferência, foi apresentado um conjunto de evidências científicas de que os óxidos de enxofre e nitrogênio viajavam longas distâncias, ultrapassando inclusive a fronteira dos países emissores. Isso desafiou as fronteiras nacionais e culturais sobre a governança ambiental, trazendo novos desafios de alta complexidade para a relação entre ciência e política (SUNDQVIST; LETELL; LIDSKOG, 2002).

Em 1979, foi adotada a Convenção sobre Poluição Transfronteiriça a Longa Distância (CRLTAP, do inglês *Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution*). Objetivando reduzir as emissões de óxidos de enxofre e nitrogênio, sobretudo no contexto da chuva ácida, a CRLTAP estabeleceu um marco importante na cooperação internacional para abordar a poluição do ar transfronteiriça, sendo o primeiro tratado multilateral sobre questões ambientais atmosféricas. A convenção foi negociada no âmbito da Comissão Econômica para a Europa das Nações Unidas (UNECE), sendo assinada por 33 partes ainda em 1979 (SUNDQVIST; LETELL; LIDSKOG, 2002).

Contudo, alguns países europeus mostraram-se inicialmente refratários às conclusões do relatório da CRLTAP, em termos da necessidade de ação para conter as emissões de NO_x e SO_x, particularmente a Alemanha e o Reino Unido. O governo alemão, porém, abandonou tal posicionamento ainda no início da década de 1980. A principal motivação foram as pressões políticas a reboque da constatação de que a chuva ácida poderia estar por trás do processo de extinção de suas florestas (*Waldsterben*) (DER SPIEGEL, 1981). Isolado no posicionamento ambiental, o Reino Unido era referido como o “*dirty man*” da Europa³⁹ (TURNHEIM, 2012).

As pressões contínuas na seara internacional levaram à proposta de uma Diretiva de Grandes Instalações de Combustão (LCPD) da Comunidade Europeia em 1983 e do protocolo de Helsinque, em 1985, no qual os signatários (dentre os quais o Reino Unido não se incluiu) se comprometeram a reduzir suas emissões de SO_x e NO_x, limitando a poluição do ar transfronteiriça. Em 1988, a LCPD

³⁹ Trata-se de uma referência ao livro de 1990 intitulado “The dirty man of Europe: the great British pollution scandal”, escrito pelo ambientalista Chris Rose, que trabalhou nas três principais organizações não-governamentais ambientais do mundo (*Friends of the Earth*, *Greenpeace* e o *World Wide Fund for Nature*) ao longo da década de 1980.

finalmente foi assinada, requerendo aos países membros (desta vez incluindo o Reino Unido) a elaboração de planos nacionais para limitar emissões de SO₂ e NO_x (TURNHEIM, 2012).

Assim, a questão da chuva ácida fez emergir a problemática da poluição transfronteiriça no debate ambiental internacional. Com isso, foram criados instrumentos de cooperação para governança ambiental, que contribuíram para a melhoria da qualidade do ar nos países e serviram de modelo para o enfrentamento de outros desafios globais, particularmente a mudança do clima.

Poluição climática: o problema do aquecimento global

Definições

A poluição climática está associada à emissão de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera. Os GEE absorvem radiação infravermelha de onda longa (ou seja, de baixa frequência), causando um aumento da temperatura da atmosfera. Esse fenômeno é referido na literatura especializada como forçamento radiativo, sendo o mecanismo por trás do chamado efeito estufa. O efeito estufa é um fenômeno natural da atmosfera que dá suporte à vida na Terra. Sem ele a temperatura média na superfície do planeta seria de aproximadamente -18°C ao invés de 15°C (NASA, 2023), o que seria insuficiente para manutenção das principais formas de vida existentes.

Contudo, observa-se um contínuo e anômalo aumento na concentração desses gases na atmosfera desde o século XIX, no período que sucedeu a primeira revolução industrial. Tal fenômeno, que vem se intensificando nas últimas décadas, intensifica o forçamento radiativo na atmosfera, causando um aumento anormal da temperatura média do planeta, o que se denomina aquecimento global. Nesse sentido, o sexto relatório do WG1 do IPCC é categórico em apontar como inequívoca a relação entre o aquecimento global e as atividades humanas que emitem GEE (IPCC, 2021).

Como reflexo do aquecimento global, verifica-se uma mudança do clima no planeta. O clima relaciona-se de forma interdependente com os ecossistemas, a biodiversidade e as sociedades humanas. Dessa forma, a mudança do clima atual e

projetada para o futuro impacta prejudicialmente os sistemas humanos e naturais, tanto por seus efeitos deletérios crônicos e contínuos, quanto pelo agravamento e aumento da frequência de eventos climáticos extremos. Exemplos desses eventos climáticos extremos são ondas de calor, ciclones, chuvas torrenciais, secas prolongadas e grandes incêndios florestais. Tais efeitos levam à perda de ecossistemas, incluindo ecossistemas terrestres, de água doce, oceânicos e costeiros, incluindo recifes de coral tropicais; à redução da segurança alimentar; ao aumento das pressões para migração e o deslocamento; a prejuízos aos meios de subsistência, saúde e segurança das pessoas; e ao aumento da desigualdade (IPCC, 2022b).

Assim, a magnitude da mudança do clima está diretamente associada ao nível do aquecimento global. Nesse sentido, quanto maior o aquecimento, maiores os riscos associados a seus efeitos deletérios. Um risco particularmente relevante são os chamados pontos de não retorno, que congregam elementos de equilíbrio instável dos ecossistemas terrestres e aquáticos. A partir de um certo limiar de mudança do clima, tais elementos podem sofrer transformações abruptas, podendo desencadear processos retroalimentados, que seguirão seu curso mesmo que o processo que lhes originou cesse (MÜLLER-CASSERES; CUNHA, 2020). Dentre os pontos de não retorno, destacam-se o degelo da criosfera (PATTYN *et al.*, 2018), a savanização da floresta amazônica (NOBRE *et al.*, 2016) e a liberação de metano na permafrost (TURETSKY *et al.*, 2019).

Dos GEE emitidos por fontes antrópicas, as principais espécies são respectivamente o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄), o óxido nitroso (N₂O) e os gases fluoretados. Cada um desses gases apresenta características próprias quanto ao tempo de permanência na atmosfera e à intensidade com a qual induzem o efeito de forçamento radiativo (IPCC, 2021). Para harmonizar as informações sobre o efeito combinado das emissões dos diferentes tipos de GEE, há um conjunto de métricas de equivalência entre os gases. A métrica geralmente empregada para essa equivalência em inventários de emissões de GEE e modelos de avaliação integrada para planejamento de longo prazo é a de *Global Warming Potential* com horizonte de avaliação de 100 anos (GWP-100) (IPCC, 2022a). Nessa métrica, a massa do CO₂ é utilizada como elemento de equivalência, visto ser este o

GEE com maior tempo de vida na atmosfera e também aquele com emissões antrópicas mais relevantes para o aquecimento global. Na Tabela B.3 são apresentados os fatores de equivalência dos principais GEE, de acordo com o AR-6 (IPCC, 2021).

Tabela B.3. Fatores de equivalência dos principais GEE pela métrica GWP-100/AR-6

Espécies	GWP-100	
CO ₂	1	
CH ₄ (origem fóssil)	29,8	
CH ₄ (origem não-fóssil)	27,0	
N ₂ O	273	
	HFC-32	771
Gases fluoretados	HFC-134 ^a	1.526
	CFC-11	6.226
	PFC-14	7.380

Fonte: Adaptado de IPCC (2021).

Globalmente, as emissões globais de GEE em 2019 foram de 59 GtCO₂ equivalente (CO₂e), das quais 75% foram de CO₂, 18% de metano, 4% de N₂O e 2% de gases fluoretados (IPCC, 2022a). As emissões de CO₂ são oriundas principalmente da queima de combustíveis fósseis e de processos industriais (85%), porém outra parte relevante (15%) vem do setor de agricultura, florestas e outros usos da terra (AFOLU, do inglês *agriculture, forests and other land uses*), associada sobretudo a desmatamento. O CH₄ também é emitido no setor de energia, visto que é um dos principais hidrocarbonetos gerados nos processos de formação dos combustíveis fósseis. Contudo, outra parte relevante das emissões de metano (41%) vem do setor de AFOLU. O N₂O provém em sua maior parte do setor de AFOLU (69%), particularmente pela aplicação de fertilizantes nitrogenados na agricultura, sendo o restante das emissões associado a processos industriais. Já os gases fluoretados são em geral produtos de processos industriais (IPCC, 2022a).

Em suma, a mudança climática está intimamente associada à pressão antrópica sobre o ciclo biogeoquímico global do carbono. Sob a ótica deste ciclo, os ecossistemas terrestres e aquáticos e a atmosfera podem ser entendidos como

grandes reservatórios de carbono, apresentando fluxos bidirecionais equilibrados, associados a seus processos naturais de manutenção, como a respiração, a fotossíntese e as trocas gasosas entre atmosfera e os oceanos. No contexto do uso de combustíveis fósseis, a influência antrópica sobre o ciclo está na emissão do carbono estocado geologicamente na matéria fóssil para a atmosfera, ocasionando um desequilíbrio quantitativo (IPCC, 2021). A Figura B-5 representa esquematicamente, de forma simplificada, a influência antrópica sobre o ciclo global do carbono no que tange o uso de combustíveis fósseis.

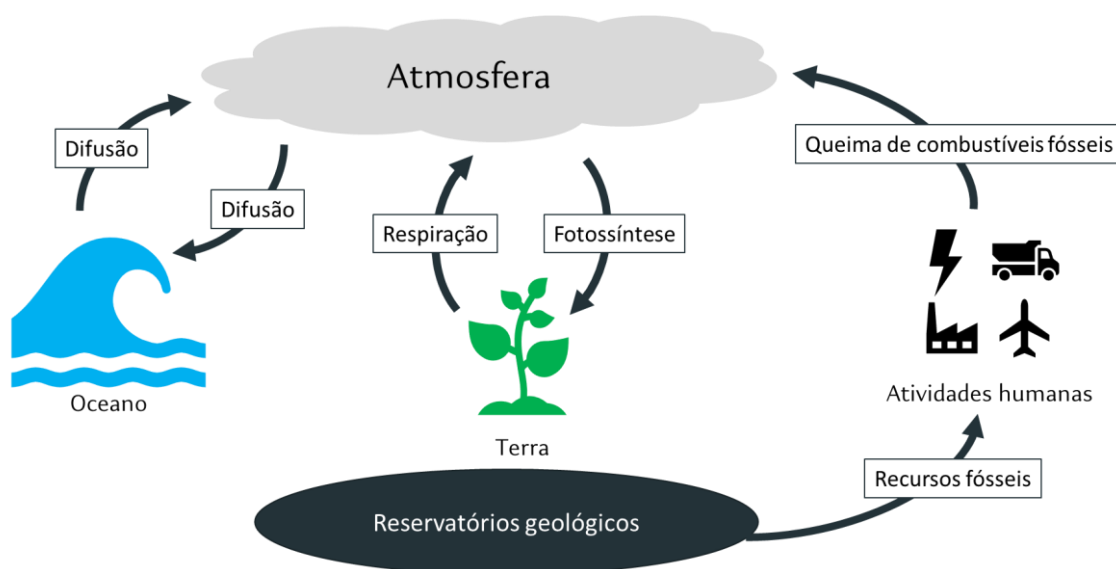


Figura B-5. Esquematização representativa do uso de combustíveis fósseis sobre o ciclo do carbono

Fonte: Elaboração própria

Com isso, apenas parte do carbono adicional proveniente das emissões antrópicas acumula-se na atmosfera. Outra parte é incorporada nos ecossistemas terrestres e aquáticos, muitas vezes referidos como “sumidouros” para o carbono atmosférico. De acordo com o IPCC (2021), dos 655 Pg de carbono emitidos cumulativamente pelos seres humanos à atmosfera desde 1850, apenas 265 Pg (40%) acumularam-se na atmosfera.

Enquanto um recurso fóssil, o carvão mineral emite GEE em diferentes estágios de sua cadeia produtiva. De fato, o carvão mineral tem sido a fonte de energia que mais emite gás carbônico no mundo: sua queima foi responsável por um terço das 43 Gt de CO₂ emitidas em 2019 (PATHAK *et al.*, 2022). Além de CO₂, a cadeia de

carvão mineral emite significativas quantidades de metano, das quais cerca de 80% estão associadas às emissões fugitivas do gás associado ao carvão que ocorrem na mineração (CLARKE *et al.*, 2022).

Controle de emissões

O controle das emissões de poluentes climáticos do carvão mineral tem por objetivo a redução das emissões de GEE na cadeia produtiva. Nesse sentido, seu foco principal se dá pela busca de reduzir as emissões de CO₂ provenientes da queima do carvão mineral⁴⁰. As principais estratégias para evitar as emissões de GEE do carvão mineral são a co-queima e os sistemas de captura, utilização e/ou armazenamento de CO₂ (CCUS, do inglês *CO₂ capture, utilization and/or storage*).

A co-queima é uma estratégia baseada na queima conjunta de carvão mineral com algum tipo de biomassa. Como o CO₂ biogênico é considerado neutro para fins de contabilização de emissões de GEE⁴¹, a biomassa dilui a emissão de carbono fóssil para a atmosfera. Assim, quanto maior a relação entre o carbono biogênico com carbono fóssil na co-queima, menor será a emissão líquida de GEE do processo. Naturalmente, o teor máximo aceitável de biomassa na mistura está sujeito a limitações técnicas do coprocessamento, tal como a restrições de oferta de biomassa (HOFFMANN, 2013; HOFFMANN; SZKLO; SCHAEFFER, 2012; ROCHEDO *et al.*, 2016).

O CCUS, por sua vez, compreende um sistema de engenharia que busca impedir que o gás carbônico, uma vez gerado no processo de queima, chegue até a atmosfera. O sistema é composto por três operações elementares com o gás carbônico: captura, transporte e utilização ou armazenamento geológico. A captura

⁴⁰ Para além do CO₂, o controle das emissões de GEE da cadeia do carvão também objetiva secundariamente a redução das emissões de metano na mineração. Para tanto, as principais estratégias estão na implementação de sistemas de captura para aproveitamento energético do gás, evitando as emissões fugitivas. Quando tecnicamente possível, geralmente o aproveitamento energético do metano das minas de carvão também é economicamente viável (CLARKE *et al.*, 2022; SINGH; SAHU, 2018).

⁴¹ A biomassa é composta pelo carbono fixado nas plantas por meio da fotossíntese, ou seja, que tem origem no CO₂ diluído na atmosfera. Portanto, a queima da biomassa gera CO₂ com carbono de origem biogênica que, diferentemente do CO₂ fóssil, não representa um incremento ao ciclo do carbono. Sendo assim, o CO₂ biogênico proveniente da queima da biomassa é considerado neutro para fins de contabilização de emissões de GEE (FUSS *et al.*, 2014; MINX *et al.*, 2018; SMITH *et al.*, 2016).

consiste na separação seletiva do CO₂ diluído na corrente de gases de combustão, objetivando a obtenção de uma corrente de elevada pureza de CO₂ para seguir na cadeia do CCUS. O transporte representa as operações associadas à movimentação do CO₂ entre as fontes e os destinos finais. Por fim, consideram-se em geral dois destinos possíveis para o CO₂. Um deles é a utilização, em que o CO₂ é reaproveitado como insumo industrial. O outro é o armazenamento geológico, em que o gás carbônico é injetado em algum sítio geológico capaz de prover seu armazenamento permanente, impedindo que o gás chegue à atmosfera (BUI *et al.*, 2018; NOGUEIRA DE OLIVEIRA *et al.*, 2016; ROCHEDO *et al.*, 2016).

- **Captura de CO₂**

Há uma série de tecnologias que podem ser empregadas para a captura de CO₂. Essas tecnologias são classificadas em três grupos: pré-combustão, oxicomustão, pós-combustão e looping químico (ROCHEDO *et al.*, 2016).

A captura pré-combustão, como o nome sugere, compreende tecnologias que capturam o CO₂ antes do processo de queima. São aplicáveis apenas a processos de gasificação, em que o combustível não é diretamente queimado, mas convertido em gás de síntese, uma mistura de CO, H₂ e CO₂. Desta mistura, é possível proceder à separação do CO₂, enquanto as demais espécies são encaminhadas a processos de aproveitamento energético a jusante (ROCHEDO, 2011).

A oxicomustão é a queima do combustível com ar enriquecido com oxigênio ou mesmo oxigênio puro. Sem o alto teor de nitrogênio do ar atmosférico, a queima via oxicomustão gera uma corrente mais concentrada em CO₂, o que facilita sua captura. Além da captura facilitada do CO₂, como já mencionado anteriormente a oxicomustão também é uma maneira de controle das emissões de NO_x (ROCHEDO, 2011).

O looping químico é uma técnica que utiliza compostos como carregadores regeneráveis do CO₂, geralmente óxidos metálicos. O carregador liga-se seletivamente ao CO₂ da queima do combustível, sendo regenerado em um

sistema de calcinação que opera em elevadas temperaturas (KEARNS; LIU; CONSOLI, 2021; NETO; SZKLO; ROCHEDO, 2021).

A pós-combustão, por sua vez, consiste na separação do CO₂ presente de forma diluída na corrente de gases de combustão. Ao contrário das demais, a tecnologia pós-combustão pode ser implementada como um módulo incremental a um processo existente, pois de forma geral representa um tratamento adicional ao gás exausto da combustão (ROCHEDO, 2011). Há diversas tecnologias que podem ser empregadas no processo de captura de CO₂ pós-combustão, a citar a captura por absorção química com aminas, por adsorção com sólidos e por sistemas de membranas (BERKENPAS *et al.*, 2018; BUI *et al.*, 2018; ROCHEDO *et al.*, 2016). Dentre as tecnologias de captura pós-combustão, a absorção química com aminas pode ser considerada o benchmark tecnológico, visto que é aplicada há décadas para captura de CO₂ (BUI *et al.*, 2018; KEARNS; LIU; CONSOLI, 2021; MIRZA; KEARNS, 2022).

- **Transporte**

O transporte do CO₂, apesar de omitido na sigla CCUS, é uma etapa crítica da cadeia, fundamental para a avaliação da viabilidade técnica e econômica da cadeia produtiva. As operações de transporte requerem um planejamento adequado para conexão entre as fontes e sumidouros de CO₂, que devem levar em conta alguns elementos-chave de influência sobre o custo, tais como o volume transportado, a pressão de transporte e o modal desejado (DA SILVA, F. T. F. *et al.*, 2018; KEARNS; LIU; CONSOLI, 2021).

Dentre os modais para o transporte de CO₂, usualmente são considerados dutos, caminhões ou trens, para as operações onshore, e dutos ou navios para as operações offshore (KEARNS; LIU; CONSOLI, 2021). Há ainda a possibilidade de integração intermodal em redes de transporte, que apresentam possibilidades de redução dos custos das operações (DA SILVA, F. T. F. *et al.*, 2018).

- **Utilização ou armazenamento geológico**

A destinação do CO₂ é a última etapa da cadeia de CCUS, na qual o gás é direcionado para uso como insumo industrial ou para o armazenamento

geológico permanente. A escolha da destinação do CO₂ em geral prioriza aplicações que agreguem valor ao gás sempre que possível, ou seja, a utilização. Assim, quando a utilização não é tecnicamente ou economicamente viável, o CO₂ é direcionado ao armazenamento permanente.

Historicamente, o principal destino para o CO₂ em sistemas de CCUS é a recuperação avançada de petróleo (EOR, do inglês *Enhanced Oil Recovery*), em que o gás é injetado para aumentar a pressão de reservatórios com produção ativa, aumentando o nível de recuperação de óleo, enquanto o gás resta permanentemente armazenado nas rochas sedimentares (BUI *et al.*, 2018; DE C. MERSCHMANN; SZKLO; SCHAEFFER, 2016; KEARNS; LIU; CONSOLI, 2021; MIRZA; KEARNS, 2022; ROCHEDO *et al.*, 2016). Assim, a operação de EOR emprega o CO₂ como uma utilidade de processo, possibilitando remunerar a cadeia produtiva do CCUS com a renda proveniente do petróleo marginal produzido (DE C. MERSCHMANN; SZKLO; SCHAEFFER, 2016).

Além de EOR, o CO₂ é amplamente utilizado na indústria de fertilizantes, sendo combinado com a amônia para fabricação de ureia. Contudo, há geração de CO₂ na produção da amônia em sua rota de produção mais usual, a partir do gás natural. Como a produção de ureia usualmente se dá de forma integrada com a produção de amônia, o CO₂ que é empregado na síntese de ureia usualmente provém do próprio processo (BRASIL, 2017). Outras possibilidades menos exploradas de utilização industrial do CO₂ são como insumo na fabricação de combustíveis sintéticos, produtos químicos e agregados de construção (IEA, 2023a).

Para o armazenamento geológico, o CO₂ precisa ser comprimido a uma elevada pressão (usualmente acima de 100 bar), de forma que fique em estado supercrítico, para ser injetado em uma formação geológica de ao menos 800 m de profundidade (KEARNS; LIU; CONSOLI, 2021). A injeção deve ocorrer em formações geológicas que proporcionem mecanismos de trapeamento físico ou geoquímico do gás, de forma que o CO₂ se mantenha permanentemente estocado em suas estruturas (BRASIL, 2017). Os sítios mais apropriados para armazenamento geológico de CO₂ são reservatórios deplecionados de óleo e gás

e aquíferos salinos, porém também há estudos para injeção de CO₂ para recuperação de metano em leitos de carvão nas minas e de mineralização do gás carbônico para a formação de carbonatos sólidos (BRASIL, 2017; KEARNS; LIU; CONSOLI, 2021).

O “phase-out/phase-down” do carvão mineral

Na esteira dos mecanismos de cooperação internacional criados desde a década de 1970 para resolução dos problemas ambientais transfronteiriços, emerge na década de 1980 uma crescente preocupação sobre o meio ambiente em nível global, associada à mudança do clima (TURNHEIM, 2012). O problema assemelha-se a seus predecessores no quesito geográfico, visto que assim como a chuva ácida e a depleção da camada de ozônio, a mudança climática lida com poluentes em escala global. O ineditismo da questão climática em relação aos demais, contudo, está no aspecto temporal: enquanto os impactos dos outros problemas ambientais são verificados pela própria geração que emitiu os poluentes, o acúmulo de GEE na atmosfera é um processo crônico, cujos impactos são transmitidos às gerações futuras.

Nesse sentido, no ano de 1987 foi publicado pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento das Nações Unidas o relatório “Our Common Future”, conhecido popularmente como “Relatório Brundtland” (BRUNDTLAND, 1987). O relatório enfatizou a importância de atender às necessidades das gerações presentes de forma a não comprometer a capacidade de as gerações futuras poderem suprir suas próprias demandas. Com isso, foi introduzido o conceito do desenvolvimento sustentável.

Em termos da ação climática global, seu marco inicial pode ser definido como a criação do IPCC, em 1988. O IPCC é o órgão intergovernamental que reúne todo o conhecimento científico sobre mudança do clima, compilando-o em relatórios públicos. Os grupos de trabalho do IPCC (WG, do inglês *Working Group*) são divididos em três áreas temáticas: o primeiro (WG1) trata da ciência física por trás dos fenômenos climáticos associados ao aquecimento global; o segundo (WG2) revisa os trabalhos associados a impactos, vulnerabilidade e adaptação à mudança do clima; e o terceiro (WG3) aborda a ciência associada à mitigação da mudança

climática, apontando caminhos para redução das emissões globais líquidas de GEE (FRANGETTO; VEIGA; LUEDEMANN, 2018; SCHAEFFER *et al.*, 2020).

Em termos de governança, o marco inicial dá-se em 1992, pela criação da Convenção-Quadro da Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC, do inglês *United Nations Framework Convention on Climate Change*), no âmbito da Conferência do Clima Rio-92. A convenção objetiva a estabilização da concentração de GEE em níveis considerados seguros ou aceitáveis pela ciência. Sua criação é um marco sobretudo do reconhecimento do problema climático pelos governos signatários, que passaram a enviar representantes anualmente para a Conferência das Partes (COP, do inglês *Conference of Parties*), o maior foro de discussão global sobre a implementação dos objetivos da convenção. A primeira COP ocorreu em 1995, em Berlim (SCHAEFFER *et al.*, 2020).

No que concerne a política global para redução das emissões de GEE, o primeiro instrumento elaborado nesse sentido foi o Protocolo de Quioto, criado na COP 3, em 1997, tendo entrado em vigor em 2005. O Protocolo de Quioto foi elaborado sob o princípio da responsabilidade comum, porém diferenciada dos países, no qual os países industrializados deveriam propor esforços maiores para redução de suas emissões de GEE, à medida que historicamente haviam emitido mais poluentes climáticos à atmosfera. Com isso, 36 países industrializados mais a União Europeia foram incluídos no Anexo I do Protocolo de Quioto, para os quais se estabeleceram metas individuais e obrigatórias de redução das emissões de GEE. Os países em desenvolvimento (não Anexo I), por sua vez, poderiam participar voluntariamente do Protocolo (FRANGETTO; VEIGA; LUEDEMANN, 2018; SCHAEFFER *et al.*, 2020).

Na sequência da criação do protocolo, em 2001, foram propostos mecanismos de flexibilização para que os países Anexo I pudessem cumprir suas metas. Tais mecanismos incluíram o esquema de comércio de emissões (ETS), a implementação conjunta (JI) e o mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL). O ETS permitiu a formação de um mercado de créditos de carbono, em que os países que obtivessem reduções de emissões além de suas metas poderiam comercializar o excedente com os países que não conseguissem cumprir com seus objetivos de mitigação de GEE.

A JI e o MDL, por sua vez, foram mecanismos que permitiram o abatimento das emissões de países Anexo I por meio de investimentos em projetos transfronteiriços. A JI tratava de projetos conjuntos entre países Anexo I, enquanto o MDL dizia respeito a projetos de países Anexo I executados em países não Anexo I (CNI, 2021; SCHAEFFER *et al.*, 2020).

As experiências do Protocolo de Quioto estabeleceram as bases para a formulação de um novo acordo de governança global sobre o clima em 2015, na COP 21, em Paris. O Acordo de Paris propôs um objetivo claro de limitar o aquecimento global a níveis bem abaixo de 2°C, perseguindo esforços para não ultrapassar 1,5 °C (UNFCCC, 2015). Para tanto, o acordo não determina metas impositivas de redução de GEE a países, diferentemente do Protocolo de Quioto. No lugar disso, vale-se das contribuições nacionalmente determinadas (NDC, do inglês *Nationally Determined Contribution*) de redução de emissões, ou seja, que os próprios países propõem voluntariamente. As NDCs são revisadas pelos países a cada ciclo de 5 anos, em um ajuste sempre no sentido do aumento de sua ambição climática, o que é conhecido como “mecanismo de catraca” (GUZOVIĆ *et al.*, 2023; SCHAEFFER *et al.*, 2020).

A primeira rodada de NDCs foi proposta na COP 21 como intenções dos países, sendo ratificadas na COP 22, que ocorreu no ano seguinte em Marrakech, Marrocos. Após compilar os resultados propostos pelos países, muitos trabalhos concluíram que o esforço combinado de redução das emissões proposto pelas países em suas NDCs, conhecido como o “estoque de políticas climáticas nacionais”, seria insuficiente para manter o mundo em uma trajetória condizente com os objetivos do Acordo de Paris (ALELUIA REIS; TAVONI, 2023; BAPTISTA *et al.*, 2022; HOFMAN; VAN DER GAAST, 2019; HÖHNE *et al.*, 2020; ROELFSEMA *et al.*, 2020; ROGELJ *et al.*, 2016). Forma-se assim a chamada “lacuna de emissões” (*emissions gap*, em inglês), que pode ser definida como a diferença entre a trajetória de emissões de GEE indicativa das políticas correntes e as trajetórias que levam aos objetivos climáticos do Acordo de Paris (UNEP, 2022).

Para agravar o problema da lacuna de emissões, os planos de instalação de novas usinas a carvão mineral no mundo apontavam uma inconsistência com o

cumprimento das contribuições propostas pelos países. Van Breevort *et al.* (2015) mostraram que em 2015 havia planos para a construção de 2.440 novas plantas termelétricas a carvão mineral pelo mundo, totalizando 1.428 GW de capacidade instalada. Isso incorreria na emissão de 6,5 GtCO₂ adicionais por ano em 2030 apenas pelas novas plantas, o que somado à capacidade existente representaria emissões anuais de 12 GtCO₂ no mundo pela queima de carvão mineral em 2030 (VAN BREEVORT *et al.*, 2015).

O impacto desses planos seria ainda mais impactante para trajetórias de emissões restritas a um aquecimento de 1,5°C, como mostrou o Relatório Especial sobre Aquecimento Global de 1,5°C (SR1.5) do IPCC, publicado em 2018 (IPCC, 2018). O SR1.5 aponta que o prejuízo da instalação de novas plantas de carvão mineral para as metas climáticas leva a um problema de trancamento tecnológico (*lock-in*). Dado que as novas plantas precisam operar por anos para recuperar o investimento realizado, seu encerramento prematuro torna-se mais difícil se comparado a plantas antigas, que estão mais próximas ou já cumpriram seu ciclo econômico. Isso faz com que a instalação de nova capacidade baseada em carvão empenhe emissões por um período relativamente grande, comprometendo os orçamentos de carbono associados às trajetórias de estabilização do nível de aquecimento em 1,5°C (IPCC, 2018).

Tais evidências geraram um consenso sobre a necessidade de encerramento global da geração termelétrica a carvão em plantas não abatidas, ou seja, sem sistema de CCUS, referido como *phase-out*, na expressão em inglês. Baseados nas trajetórias regionais do SR1.5, Parra *et al.* (2019) avaliaram que o *phase-out* completo da geração a carvão no mundo condizente com as trajetórias de 1,5°C deveria ocorrer antes de 2040. Primeiramente, deveria ocorrer em países da OCDE (Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico), da Europa Oriental e da antiga União Soviética, até 2031. Na sequência, em países da América Latina (2032), África e Oriente Médio (2034) e, finalmente, da Ásia não OCDE (2037) (PARRA *et al.*, 2019).

Essa visão de descarbonização global com grande foco sobre o uso de carvão levou a grandes expectativas sobre a COP 26, planejada para ocorrer em 2020 na

cidade de Glasgow. A conferência coincidia com o período planejado para a primeira rodada de revisões quinquenais das NDCs, gerando expectativas sobre anúncios de novos compromissos de *phase-out* da geração termelétrica a carvão. A COP 26 acabou adiada por um ano, em decorrência da pandemia de COVID-19, sendo realizada em 2021 (FEDSON, 2019; GUZOVIĆ *et al.*, 2023).

Da COP 26 saiu o Pacto de Glasgow para o Clima, no qual uma posição sobre a geração a carvão em plantas não abatidas foi pela primeira vez acordada entre os países signatários (GUZOVIĆ *et al.*, 2023). Contudo, as negociações conduziram a um texto final com uma linguagem suavizada a esse respeito: ao invés do termo *phase-out*, optou-se pelo uso do termo *phase-down* (UNFCCC, 2021), em função de uma emenda proposta por China e Índia (HOOK; HODGSON; PICKARD, 2021). Não obstante, o termo *phase-out* foi mantido para tratar do fim dos subsídios ineficientes a combustíveis fósseis (UNFCCC, 2021).