

Ministério da Educação
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia de Produção, Administração e Economia

LUCIANA CARVALHO GARCIA

Planos de descarbonização de empresas energo-intensivas no Brasil: uma análise de sustentabilidade

Ouro Preto
2024

Luciana Carvalho Garcia

Planos de descarbonização de empresas energo-intensivas no Brasil: uma análise de sustentabilidade

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenharia de Produção.

Universidade Federal de Ouro Preto

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Nikolaus Pinto de Moura

Ouro Preto
2024



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO,
ADMINISTRAÇÃO E ECON



FOLHA DE APROVAÇÃO

Luciana Carvalho Garcia

Planos de descarbonização de empresas energo-intensivas no Brasil: uma análise de sustentabilidade

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira de Produção

Aprovada em 12 de setembro de 2024

Membros da banca

D.Sc. - Gustavo Nikolaus Pinto de Moura - Orientador(a) Universidade Federal de Ouro Preto
D.Sc. - Bruna de Fátima Pedrosa Guedes Flausino - Universidade Federal de Ouro Preto
M.Sc. - Claver Antonio Fontes Vilela - Universidade Federal de Ouro Preto

Gustavo Nikolaus Pinto de Moura, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 12/09/2024



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Nikolaus Pinto de Moura, PROFESSOR DE MAGISTÉRIO SUPERIOR**, em 12/09/2024, às 19:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Bruna de Fatima Pedrosa Guedes Flausino, PROFESSOR DE MAGISTÉRIO SUPERIOR**, em 12/09/2024, às 20:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Claver Antonio Fontes Vilela, PROFESSOR DE MAGISTÉRIO SUPERIOR**, em 20/09/2024, às 11:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0777108** e o código CRC **A74184F0**.

Ao meu filho Lorenzo, o qual chegou em minha vida no decorrer deste trabalho.

Resumo

No caminho rumo à descarbonização, empresas de setores energo-intensivos se tornam importantes atores a fim de que sejam atingidos os objetivos propostos no Acordo de Paris. Logo, as corporações a serem estudadas nesta pesquisa são de três dos setores produtivos mais energo-intensivos do Brasil: petrolífero, de mineração e siderúrgico. A análise dos compromissos das empresas brasileiras voltados à sustentabilidade e ao combate às mudanças climáticas surge como proposta deste trabalho, o qual identifica os planos de descarbonização de cada empresa a fim de que seja avaliada a assertividade das corporações em relação às metas. Em primeiro lugar, esta pesquisa traz informações sobre os setores energo-intensivos citados, tanto no Brasil quanto em nível global. Adicionalmente, analisa a matriz energética de cada setor e suas ações relacionadas à mudança para práticas menos poluentes. Em seguida, os planos de descarbonização da Petrobras, Vale e Gerdau são estudados. Tais planos apresentam quais ações são propostas pelas empresas para reduzir suas emissões de gases de efeito estufa, além de compartilharem metas traçadas e seus respectivos prazos. Também é realizada uma análise competitiva entre corporações do mesmo ramo a fim de entender como outras empresas do mercado estão lidando com as questões climáticas. Os resultados obtidos a respeito dos planos de descarbonização mostram que muitas metas não são ambiciosas. Compromissos pouco explorados e passíveis de melhorias são observados nas três empresas estudadas, além de informações não apresentadas de forma clara no que diz respeito à estratégia de redução de emissões. Embora as corporações brasileiras possuam compromissos em linha aos de empresas estrangeiras do mesmo setor, é possível concluir que metas mais abrangentes, ambiciosas e que retratem de maneira transparente as reais perspectivas das corporações são cruciais para percorrer o longo e importante caminho em direção às emissões líquidas zero.

Palavras-chave: planos de descarbonização; sustentabilidade; mudanças climáticas; petróleo; mineração; siderurgia

Abstract

On the path towards decarbonization, companies from energy-intensive sectors become important players in achieving the goals proposed in the Paris Agreement. Therefore, the corporations to be studied in this research are from three of the most energy-intensive production sectors in Brazil: oil, mining and steel. The analysis of the commitments of Brazilian companies aimed at sustainability and combating climate change emerges as a proposal of this work, which identifies the decarbonization plans of each company in order to assess the assertiveness of the corporations in relation to the goals. First, this research provides information on the energy-intensive sectors mentioned, both in Brazil and at a global level. Additionally, it analyzes the energy matrix of each sector and its actions related to the change to less polluting practices. Next, the decarbonization plans of Petrobras, Vale and Gerdau are studied. These plans present which actions are proposed by the companies to reduce their greenhouse gas emissions, in addition to sharing established goals and their respective deadlines. A competitive analysis is also conducted between corporations in the same sector in order to understand how other companies in the market are dealing with climate issues. The results obtained regarding decarbonization plans show that many goals are not ambitious. Commitments that are little explored and that could be improved are observed in the three companies studied, in addition to information that is not presented clearly regarding the strategy for reducing emissions. Although Brazilian corporations have commitments in line with those of foreign companies in the same sector, it is possible to conclude that more comprehensive, ambitious goals that transparently portray the corporations' real perspectives are crucial to travel the long and important path towards net zero emissions.

Keywords: decarbonization plans; sustainability; climate change; oil; mining; steel industry

Lista de abreviaturas e siglas

AIE	Agência Internacional de Energia
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BF	<i>Blast Furnaces</i>
CADE	Conselho Administrativo de Defesa Econômica
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
CBIO	Crédito de Descarbonização para Biocombustíveis
CCS	<i>Carbon Capture and Storage</i>
CCUS	<i>Carbon Capture, Utilization and Storage</i>
CE	<i>Circular Economy</i>
CEBDS	Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável
CH ₄	Metano
CL	Conteúdo Local
CO ₂	Dióxido de Carbono
COP	Conferência das Partes
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
CST	Companhia Siderúrgica de Tubarão
E&P	Exploração e Produção
EAF	<i>Electric Arc Furnace</i>
EII	<i>Energy Intensive Industries</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ESG	<i>Environmental, Social and Governance</i>
FAPEMIG	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais
GEE	Gases de Efeito Estufa
H ₂ O	Água

H ₂ S	Sulfeto de Hidrogênio
HC	Hidrocarboneto
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
ICMM	<i>International Council on Mining and Metals</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IED	Investimento Estrangeiro Direto
INDA	Instituto Nacional dos Distribuidores de Aço
Ineep	Instituto de Estudos Estratégicos de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
Ipea	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
Mercor	Monitor Empresarial de Reputação Corporativa
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
NAICS	<i>North American Industry Classification System</i>
NDC	<i>Nationally Determined Contribution</i>
NZE	<i>Net Zero Emissions</i>
NYSE	<i>New York Stock Exchange</i>
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OMM	Organização Meteorológica Mundial
ONG	Organização Não Governamental
ONU	Organização das Nações Unidas
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento

P&G	Petróleo e Gás
PBio	Petrobras Biocombustível
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PIB	Produto Interno Bruto
PNE	Plano Nacional de Energia
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PPA	<i>Power Purchase Agreement</i>
RCLE-UE	Regime Comunitário de Licenças de Emissão da União Europeia
RSC	Responsabilidade Social Corporativa
SINOBRAS	Siderúrgica Norte Brasil S.A.
TCFD	<i>Task Force on Climate-Related Financial Disclosures</i>
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
VP	Valor Presente

Lista de ilustrações

Figura 1 – Matriz Energética do Setor Energético	27
Figura 2 – Matriz Energética do Setor de Mineração e Pelotização	34
Figura 3 – Matriz Energética do Setor de Ferro-gusa e Aço	45
Figura 4 – Compromissos de Clima Petrobras	52
Figura 5 – Petrobras x ExxonMobil	54
Figura 6 – Emissões de GEE Petrobras	55
Figura 7 – Emissões de Metano Petrobras	56
Figura 8 – Riscos Físicos da Vale	59
Figura 9 – Vale x BHP	61
Figura 10 – Emissões Operacionais da Vale	62
Figura 11 – Compromisso para 2031 Gerdau	66
Figura 12 – Gerdau x ArcelorMittal	67
Figura 13 – Emissões de GEE Gerdau	68
Figura 14 – Oportunidade para 2031 Gerdau	69

Lista de tabelas

Tabela 1 – Síntese Empresas Energo-Intensivas	71
---	----

Lista de quadros

Quadro 1 – Compromissos Plano Estratégico 2020-2024 Petrobras	50
---	----

Sumário

	Lista de ilustrações	12
	Lista de tabelas	13
	Lista de quadros	14
1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivo geral	19
1.2	Objetivos específicos	19
2	METODOLOGIA	20
3	REFERENCIAL TEÓRICO	21
3.1	Setor Petrolífero	21
3.2	Setor de Mineração	29
3.3	Setor Siderúrgico	38
4	PLANOS DE DESCARBONIZAÇÃO	49
4.1	Petrobras	49
4.2	Vale	57
4.3	Gerdau	63
4.4	Análise comparativa	70
5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
	REFERÊNCIAS	75

1 Introdução

Segundo o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (2023), o Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima ou *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), foi criado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) em 1988 para fornecer aos formuladores de políticas avaliações científicas regulares das mudanças climáticas, suas implicações e possíveis riscos futuros, bem como propor opções de adaptação e mitigação. O IPCC conta com 195 países membros, incluindo o Brasil.

Por meio de suas avaliações, o IPCC determina o estado do conhecimento sobre mudanças climáticas, identifica aspectos consensuais na comunidade científica e em quais áreas mais pesquisas são necessárias. Os relatórios resultantes da avaliação do IPCC devem ser neutros, relevantes para a elaboração de políticas públicas e não prescritivos. Além disso, as avaliações são insumos essenciais para as negociações internacionais voltadas para o enfrentamento das mudanças climáticas (MCTI, 2023).

Em 1992, o Rio de Janeiro sediou a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento, que ficou conhecida como Eco-92 ou Rio-92. A Conferência ajudou a consolidar a consciência ambiental e ecológica, a fim de que o tema entrasse definitivamente na agenda dos cinco continentes. De acordo com o Ipea (2009), um dos documentos ratificados pela reunião foi a Agenda 21. Ela colocou no papel uma série de políticas e ações que tinham como eixo o compromisso com a responsabilidade ambiental.

Basicamente, a Agenda 21 concentrou-se nas mudanças necessárias nos padrões de consumo, na proteção dos recursos naturais e no desenvolvimento de tecnologias capazes de reforçar a gestão ambiental dos países. Além dela, outros tratados importantes foram assinados durante a Rio-92, como as convenções da Biodiversidade, das Mudanças Climáticas e da Desertificação, a Carta da Terra e a Declaração sobre Florestas (IPEA, 2009).

Também foi adotada a Conferência das Partes (COP), órgão supremo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, a qual começou a ser realizada a partir do ano de 1995 na cidade de Berlim, Alemanha (COP 1). Segundo o Ministério do Meio Ambiente (2022), o Protocolo de Kyoto, criado em 1997 durante a COP 3, foi um tratado complementar à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, definindo metas de redução de emissões para países desenvolvidos e aqueles que, à época, tinham uma economia em transição para o capitalismo. O Protocolo entrou em vigor em 16 de fevereiro de 2005, logo após cumprir as condições que exigiam a ratificação de pelo menos 55% do total de países membros da Convenção e que foram responsáveis por pelo menos 55% do total de emissões de gases do efeito estufa em 1990.

Anos depois, durante a COP 21 em Paris, foi discutido entre 195 países o Acordo de

Paris, um tratado global que objetiva reduzir as emissões de gases de efeito estufa para limitar o aumento da temperatura a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais. O compromisso internacional foi aprovado em 12 de dezembro de 2015 e entrou oficialmente em vigor em 4 de novembro de 2016. Mais flexível, o Acordo de Paris entrou em vigor em tempo recorde para um compromisso climático dessa magnitude. Avançou quanto às responsabilidades dos países em relação ao Protocolo de Kyoto, ainda que imponha ajuda externa aos países em desenvolvimento. Para o acordo entrar em vigor, substituindo o Protocolo de Kyoto a partir de 2020, 55 países que respondiam por 55% das emissões de gases de efeito estufa tiveram que ratificá-lo (CEBDS, 2019).

De acordo com Pucci (2021), o Brasil produziu um documento que foi entregue contendo todas as estratégias do país para cumprir os compromissos estabelecidos no Acordo de Paris, principalmente relacionados à redução de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), por meio de diversas estratégias. Em 2016, a Câmara dos Deputados e o Senado aprovaram os termos do Acordo e o presidente logo os ratificou. Em 2017, foi apresentada a proposta do RenovaBio e uma Medida Provisória foi assinada pelo presidente da república. O Brasil tenta cumprir parte dos compromissos assumidos no Acordo de Paris por meio da Política Nacional de Biocombustíveis, também chamada de RenovaBio.

O programa objetiva ser capaz de incentivar os setores produtivos nacionais a reduzir as emissões de GEE, ampliar a oferta e a demanda por biocombustíveis na matriz energética e, ainda, garantir maior previsibilidade e segurança ao mercado de combustíveis. O funcionamento do programa depende das Metas Anuais de Redução de Emissões de GEE (desdobradas em metas anuais individuais para distribuidores de combustíveis), da Certificação da Produção de Biocombustíveis no território nacional e do Crédito de Descarboxinação para Biocombustíveis – os CBIOs. As usinas produtoras de biocombustíveis devem receber certificação para fazer parte do esquema RenovaBio e, com isso, poderão emitir CBIO após a comercialização do biocombustível com nota fiscal (PUCCI, 2021).

Segundo Vigoya, Mendoza e Abril (2020), não há um consenso sobre a longevidade das reservas de petróleo. Porém, independentemente das reservas durarem décadas ou não, a transição energética já é bastante recomendada. Muitos dos países mais desenvolvidos e outros membros da Organização das Nações Unidas (ONU) já estão trabalhando fortemente nas questões de transição energética, que nada mais é do que a independência das fontes de energia fóssil e a incursão tecnológica em fontes de energia limpa. No caso do Brasil, por exemplo, o país busca a descarbonização por meio do desenho de mecanismos e políticas adequadas para o desenvolvimento sustentado no uso de fontes renováveis de energia, além do aumento do uso de fontes solares de geração de energia elétrica, entre outros.

A transição energética é um dos principais desafios que a economia mundial enfrenta após a pandemia do Coronavírus. Lidar com os efeitos das mudanças climáticas envolve

um conjunto de medidas de mitigação e adaptação para alcançar uma economia de baixo carbono, ou “descarbonizada”, que seja resiliente aos choques de eventos climáticos extremos que já se fazem sentir. As profundas transformações no setor energético passam por investimentos em inovação e novas infraestruturas, atividades essencialmente financiadas pelo Estado. Atualmente, o cenário energético brasileiro tornou-se mais complexo dadas as preocupações com a segurança do abastecimento decorrentes da guerra na Ucrânia – o que levou a aumentos acentuados nos preços dos fatores de produção energéticos (SILVA; FERRAZ, 2022).

Ainda de acordo com Silva e Ferraz (2022), os efeitos se espalharam por toda a economia, afetando negativamente o poder de compra das famílias e a competitividade da indústria. A descarbonização da economia passa pela expansão das fontes renováveis na matriz energética, levando a uma mudança radical na estrutura do setor energético com aumento de custos, diferentes necessidades de financiamento, maior dificuldade de operação devido à intermitência e imprevisibilidade das novas fontes renováveis e, conseqüentemente, à necessidade de modificar os marcos regulatórios. A incerteza e os conflitos entre os agentes são crescentes e precisam ser arbitrados politicamente pelo Estado, que é responsável por garantir a segurança do abastecimento.

Em seu estado atual, o setor de energia global tem fraquezas que se manifestam através da diminuição da qualidade ambiental, dotações globais limitadas e desiguais de combustíveis fósseis, aumento da demanda global de energia e preços voláteis do petróleo. Para evitar mais danos econômicos e ambientais, é recomendada uma transição global da geração e consumo convencionais de fontes de energia não renováveis para fontes de energia renováveis (EMENEKWE et al., 2022).

Seguindo o caminho da redução progressiva das emissões absolutas de GEE, esta pesquisa analisará empresas de três setores industriais: petrolífero, de mineração e siderúrgico. Segundo a Petrobras (2022), nos segmentos de exploração, produção e refino de petróleo e gás, houve uma queda de 18% nas emissões absolutas nos últimos 6 anos: de 57 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO_2e) em 2015 para 46 milhões em 2021.

A Vale, maior mineradora do país, tem revisado suas metas climáticas e incluindo novos compromissos de redução de emissões de GEE com o objetivo de se tornar uma empresa de mineração neutra em carbono até 2050 (VALE, 2019). De acordo com a Gerdau (2022a), no ano de 2020, a empresa teve uma das menores emissões médias de GEE, de 0,93 t de CO_2e por tonelada de aço, o que representa aproximadamente metade da média global do setor de 1,89 t de CO_2e por tonelada de aço. Até 2031, a empresa pretende reduzir as emissões de carbono para 0,83 t de CO_2e por tonelada de aço. A Gerdau também anunciou sua ambição de atingir a neutralidade de carbono até 2050.

1.1 Objetivo geral

Identificar e analisar planos de descarbonização de empresas brasileiras nos setores produtivos petrolífero, de mineração e siderúrgico.

1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho constituem em:

- compreender as metas de organizações criadas no âmbito das Nações Unidas, em prol do meio ambiente;
- examinar as principais conferências ambientais já realizadas no âmbito da ONU, considerando os resultados das COPs mais relevantes;
- pesquisar sobre tratados internacionais relevantes para a mudança do clima e com compromissos mais rígidos para a redução da emissão de GEE;
- dissertar sobre três dos setores produtivos mais energo-intensivos do Brasil: Petrolífero, de Mineração e Siderúrgico;
- analisar os planos de descarbonização de grandes empresas brasileiras nos setores citados;
- verificar as estratégias utilizadas pelas empresas a fim de atingirem seus compromissos climáticos;
- averiguar a assertividade das metas das corporações, verificando se os objetivos propostos nos planos de descarbonização estão evoluindo ou sendo atualizados conforme são atingidos.

2 Metodologia

Este estudo é baseado em uma pesquisa de natureza básica, com o objetivo de gerar conhecimento, ou seja, verdades e interesses universais. Tomando como ponto de partida o objetivo geral deste trabalho - identificar e analisar os planos de descarbonização de empresas brasileiras nos setores petrolífero, de mineração e siderúrgico - optou-se por adotar uma abordagem qualitativa, por meio de pesquisa exploratória. O procedimento técnico adotado foi a pesquisa bibliográfica, o que inclui: livros, artigos científicos e publicados em congressos, dissertações de mestrado, teses de doutorado, documentos institucionais, relatórios de empresas e governos, relatórios de organizações internacionais e relatórios de organizações não governamentais.

O tipo de pesquisa escolhido para realizar o trabalho é consistente com o objetivo de analisar os últimos planos de descarbonização elaborados em cada uma das empresas brasileiras escolhidas, averiguando a assertividade das metas das corporações e verificando a evolução dos objetivos propostos nos planos de descarbonização. Essa análise permitirá verificar se as empresas estão avançando ou não nas metas relacionadas à sustentabilidade.

Este trabalho tenta avaliar as atividades e o progresso de empresas dos setores petrolífero, de mineração e siderúrgico em direção à descarbonização, com foco na avaliação quantitativa do cumprimento de metas. Primeiro, foram selecionadas as maiores empresas brasileiras dos setores citados para a análise de seus objetivos em relação à descarbonização. Em segundo lugar, foi realizada uma avaliação de como as informações são apresentadas nos relatórios corporativos e quais atividades voltadas à sustentabilidade estão sendo utilizadas, a partir da análise dos planos de descarbonização. Em terceiro lugar, foi realizada a avaliação do progresso das empresas em direção a metas relacionadas à sustentabilidade e à descarbonização. Os principais métodos utilizados neste estudo incluíram análise de conteúdo, análise crítica e comparativa, e métodos estatísticos simples.

3 Referencial teórico

O presente referencial teórico traz informações sobre os setores petrolífero, de mineração e siderúrgico no Brasil e em nível global. Adicionalmente, analisa a matriz energética dos respectivos setores e seus objetivos relacionados à mudança para práticas menos poluentes e mais sustentáveis.

3.1 Setor Petrolífero

Segundo o IBP (2022), em 2021, o Brasil foi o 9^o maior produtor de petróleo do mundo e o 30^o maior produtor de gás natural, mantendo-se na mesma posição de 2020 em ambos os aspectos. Há previsão de ascensão dessas posições, tendo em vista as novas perspectivas do setor dadas pelo Pré-sal, fato que tem contribuído para a reversão de um quadro histórico de dependência das importações de petróleo e alguns derivados. De acordo com Jr. e Silva (2019), a produção de óleo e gás no Brasil está concentrada em nove bacias petrolíferas, das quais quatro merecem destaque: as bacias de Campos, Santos, Espírito Santo e Recôncavo Baiano.

Em termos econômicos, pode-se dizer que a exploração da camada Pré-sal exige altos investimentos em tecnologia, o que encarece muito o custo de produção. Por outro lado, a dependência externa do petróleo está em trajetória de declínio há algumas décadas, sendo o Brasil autossuficiente desde 2006. Adicionalmente, o Pré-sal foi um fator determinante para alcançar esses resultados, devido ao aumento significativo de sua produção a partir de 2009 e principalmente a partir de 2018, quando o óleo extraído do Pré-sal tornou-se predominante (JR.; SILVA, 2019)

Segundo a ANP (2021), em 2020, a produção nacional de petróleo atingiu 2,9 milhões de barris/dia. O aumento foi liderado pela oferta de petróleo do Pré-sal, que atingiu uma média de 2 milhões de barris por dia no ano, cerca de 69,4% da produção do país. Na mesma linha, a produção de gás natural cresceu no seu 11^o ano consecutivo de aumento, e atingiu 128 milhões de metros cúbicos por dia (m³/dia). No Pré-sal, a produção de gás natural também continua aumentando sua participação no total nacional e correspondeu a 65,7% em 2020. Devido ao aumento da produção nacional, em 2020, as exportações de petróleo atingiram o maior valor da série histórica, 1,4 milhão de barris por dia, um aumento anual de 16,9%. As importações de petróleo, que totalizaram 135 mil barris por dia, caíram 28,9%.

De julho a dezembro de 2023, a produção nacional de petróleo foi em média 3.575 mil barris por dia (b/d), demonstrando um acréscimo de 23,3% na produção nacional de petróleo no período 2020 - 2023. Já a produção de gás natural de julho a dezembro foi em média 155 milhões m³/dia, apresentando um acréscimo de 21,1% em relação à 2020. O

mês de novembro de 2023 atingiu recorde de produção, sendo 3.678 mil b/d de petróleo e 162 milhões m³/d de gás natural (EPE, 2024). Dados do governo brasileiro demonstram que o país que detém e controla as reservas de petróleo, e mantém uma estrutura de refino adequada, tem vantagens competitivas sobre setores vitais da economia nacional (como transporte e produção de energia elétrica) e da indústria, devido à sua participação em mercados internacionais e à exportação direta de petróleo e seus derivados.

De acordo com Mancini e Paz (2018), em 1995, o governo brasileiro instou o Congresso a aprovar a Emenda Constitucional nº 9, que permitia investimentos estrangeiros no setor petrolífero. Dois anos depois, o Congresso aprovou a Lei 9.478/1997, conhecida como Lei do Petróleo, que acabou com o monopólio da Petrobras e abriu o setor à concorrência do mercado. Desde então, o governo nacional tem adotado medidas específicas para fomentar o desenvolvimento tecnológico no setor petrolífero. Após a quebra do monopólio estatal, o governo introduziu uma cláusula contratual inovadora para obrigar as empresas de petróleo a investir 1% da receita bruta dos grandes campos de petróleo em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), com o objetivo de impulsionar o desenvolvimento tecnológico.

Como grande parte da produção e das reservas brasileiras de petróleo e gás está localizada no mar, especialmente na área do Pré-sal, a Exploração e Produção (E&P) está exposta a grandes desafios tecnológicos relacionados às condições físicas e químicas extremas dos campos de petróleo. Embora a cláusula de P&D seja uma inovação na regulamentação brasileira, ela não constitui um instrumento único em termos de política de pesquisa no setor de petróleo. Globalmente, o setor tem passado por transformações consideráveis nas últimas décadas. Desde o excesso de petróleo na década de 1980, as empresas petrolíferas terceirizaram progressivamente suas atividades comerciais secundárias para empresas de serviços. Essas empresas se especializaram em atividades de alta tecnologia e se tornaram as que mais gastam em termos de P&D no setor de petróleo (MANCINI; PAZ, 2018).

Segundo Schutte (2021), a indústria petrolífera tem uma vasta experiência com políticas de Conteúdo Local (CL), particularmente na Noruega. A política de CL promove a identificação de oportunidades de crescimento de determinado setor. No caso do Brasil, CL se refere à produção no território nacional independentemente da origem do capital. Em alguns outros casos, implica priorizar capital de origem nacional. No Brasil, a oportunidade concreta foi identificada nas reservas de petróleo, principalmente nas descobertas do Pré-sal. A exploração e produção *offshore* é intensiva em capital, com grande potencial de geração de empregos e renda na cadeia produtiva. Isso também explica porque o setor petrolífero acumulou experiência internacional com CL, em particular a partir da exploração de P&G (Petróleo e Gás) no Mar do Norte, na década de 1970, pela Noruega.

No Brasil, essa política ganhou força nos governos Lula (2003-2010), mas começou a sofrer desgaste nos governos Dilma Rousseff (2011-2016). A tentativa de renegociar aspectos dessa política em 2015 veio tardiamente e, durante o governo Temer (2016-2018), sofreu um rebaixamento considerável. Esse processo se deu a partir de dois fatores.

Primeiro, a tempestade perfeita que atingiu a Petrobras em meados de 2014 e 2015, com a forte queda do preço do petróleo, e os impactos da Operação Lava Jato e outros fatores. Em segundo lugar, o desgaste a que foi submetida a política de CL, apontada como parte do problema, e não da solução, para o desenvolvimento brasileiro. A partir da análise das medidas governamentais e do posicionamento dos atores relevantes, fica claro que a política de CL foi sacrificada para atrair operadoras internacionais (SCHUTTE, 2021).

De acordo com Moise (2020), há um interesse crescente no estudo da corrupção no setor de petróleo, em escala global e nacional. Contudo, as definições abrangentes oferecidas na literatura frequentemente são muito gerais para reconhecer suas manifestações específicas neste setor. As interpretações da corrupção são contextuais e baseadas em um tempo, local e conjunto de condições específicos. Portanto, a presença de definições abrangentes de corrupção não ajuda a abordar o problema em detalhes, enquanto medidas indiretas não são úteis para descrever a evolução do fenômeno.

Até certo ponto, é da natureza do setor petrolífero criar tal tensão. Embora seja verdade que os investimentos em petróleo podem levar a lucros imensos, também é claro que o mercado de petróleo é incerto. Essa instabilidade aumenta o risco dos investimentos levarem à falência de empresas e à queda de governos. Os países podem nacionalizar o setor, mas raramente o fazem porque as empresas privadas podem empregar a tecnologia mais recente e arcar com os custos de exploração. Ainda assim, mesmo um setor de petróleo totalmente nacionalizado não está imune à corrupção. Os governos autoritários dos países produtores de petróleo muitas vezes administram mal os lucros resultantes da produção de petróleo, criando desigualdades gritantes por meio da distribuição desigual (MOISE, 2020).

Segundo Fayomi, Akande e Odigie (2019), a indústria de petróleo e gás também enfrenta muitos problemas de corrosão e contaminantes como H_2S (sulfeto de hidrogênio) e CO_2 , que deterioram tubulações e componentes de máquinas. Com o tempo, pode ocorrer corrosão nas superfícies internas dessas máquinas e até mesmo de oleodutos, responsáveis por transportar grandes quantidades de petróleo bruto e suportar grandes quantidades de pressão. Os contêineres de armazenamento de óleo e gás são feitos de alumínio e aço, que devem ser protegidos devido à sua suscetibilidade à corrosão a qual impacta direta ou indiretamente a economia. O aço e o alumínio são metais importantes usados desde a fabricação até a distribuição de produtos finais em quase todas as partes da indústria de petróleo e gás.

A corrosão representa um problema oneroso para a indústria de petróleo, plantas químicas, indústrias de manufatura, e muitas outras indústrias que usam metais. A maioria dos problemas de corrosão podem causar vazamentos químicos, quebras de tubulação e até mesmo incêndios quando expostos a componentes elétricos e materiais corroídos. Recentemente, a exploração de produtos naturais derivados de plantas como inibidores de corrosão de baixo custo e ecologicamente corretos tornou-se um campo de estudo essen-

cial e de grande interesse para os pesquisadores. Os produtos vegetais não são apenas ambientalmente aceitáveis e ecológicos, mas também fontes de materiais de baixo custo, prontamente disponíveis e renováveis (FAYOMI; AKANDE; ODIGIE, 2019).

De acordo com Aromi e Clements (2019), o petróleo bruto é uma das *commodities* mais importantes na economia real e, como tal, a relação entre os preços do petróleo e os mercados de ações mais amplos atraiu muita atenção da pesquisa. Nos últimos tempos, tem havido um crescente corpo de pesquisa sobre os impactos das notícias e da atenção da mídia nos retornos de ativos, em particular nos mercados de petróleo e ações. O aumento do fluxo de notícias sobre o petróleo reduz o impacto do mercado de ações mais amplo no setor petrolífero, o que implica que ele é impulsionado mais por choques específicos do petróleo e menos por condições mais gerais do mercado financeiro. O maior fluxo de informações sobre o petróleo também aumenta o impacto do setor petrolífero no mercado acionário mais amplo.

A indústria de E&P é definida pelo Sistema de Classificação da Indústria Norte-Americana (NAICS ou *North American Industry Classification System*) como a indústria no subsetor de extração de petróleo e gás que opera e/ou desenvolve propriedades de campos de petróleo e gás. Tais atividades podem incluir a exploração de petróleo bruto e gás natural, a perfuração de poços, e todas as outras atividades na preparação de petróleo e gás até o ponto de embarque da propriedade produtora. Este subsetor também inclui a produção de petróleo bruto, a mineração e extração de óleo de xisto betuminoso e areias betuminosas, a produção de gás natural, a recuperação de enxofre do gás natural, e a recuperação de líquidos de hidrocarbonetos (HAFEEZ, 2023).

Segundo Gandra e Junior (2023), a geração de resultados econômicos em E&P envolve descobrir e transformar o potencial do petróleo por meio da produção comercial efetiva. O segmento de E&P está fortemente vocacionado para projetos de capital, estando diretamente associado a três objetivos básicos. O primeiro objetivo consiste em descobrir, avaliar e delimitar jazidas de petróleo e gás; o segundo objetivo em desenvolver e construir sistemas de produção ou ativos de produção para drenar depósitos de petróleo e gás; e o terceiro objetivo engloba a produção e venda de petróleo e gás para gerar receitas que excedam todas as despesas e o custo de oportunidade ao longo do tempo.

Segundo Rodrigues e Feres (2022), a fim de promover o crescimento sustentável das economias, as tradicionais preocupações das nações em garantir a segurança energética diante da tendência de alta do preço do petróleo somam-se às demandas internacionais relacionadas à mitigação do processo de mudanças climáticas e dos problemas ambientais ligados ao aquecimento global. Nesse contexto, o incentivo ao desenvolvimento e produção de biocombustíveis por meio de programas e políticas governamentais tornou-se estratégico para aumentar o uso de energia renovável, diversificando a matriz energética. Enquanto o diesel é o principal combustível fóssil derivado do petróleo consumido no setor de transportes, o biodiesel se apresenta como uma alternativa eficaz para sua substituição

parcial e redução das emissões de GEE.

É possível afirmar que os objetivos nacionais de garantir a segurança energética e mitigar o aquecimento global por meio da diversificação da matriz energética, com o crescimento da produção e consumo de energias renováveis, aliados à tendência de alta do preço do petróleo, têm efetivamente constituído fatores importantes para o desenvolvimento tecnológico do setor de biodiesel nos maiores países produtores. Adicionalmente, em momentos de alta oferta de combustíveis fósseis e queda relativa de seu preço, o investimento público em P&D e a adoção de políticas podem ser fatores importantes para o contínuo desenvolvimento estratégico de inovação em biodiesel e manutenção do compromisso de aumentar a participação de energias renováveis na matriz energética (RODRIGUES; FERES, 2022).

De acordo com Cherepovitsyna et al. (2023), os esforços para controlar as mudanças climáticas com o objetivo de alcançar a neutralidade carbônica até 2050 tiveram o impacto mais significativo nas empresas que operam no setor de energia, que produzem grandes quantidades de emissões de GEE. À luz dessas políticas, algumas empresas de petróleo e gás estabeleceram metas destinadas a reduzir as emissões de GEE e alcançar a neutralidade de carbono, mas a questão permanece em aberto sobre como essas atividades e o progresso em direção a essas metas podem ser avaliados.

Com a indústria de petróleo e gás respondendo por cerca de 42% das emissões globais de GEE, o desenvolvimento estratégico das empresas de petróleo e gás está intrinsecamente ligado à descarbonização. Diante do exposto, o futuro do setor de energia passará inevitavelmente pelo desenvolvimento de fontes de energia renováveis e pela implementação de tecnologias verdes em todo o processo produtivo. Além disso, muitos grandes investidores agora exigem progresso específico em direção à neutralidade de carbono como condição para o investimento em empresas. Dadas essas circunstâncias, os *players* globais de petróleo e gás são obrigados a demonstrar seu compromisso com as metas estabelecidas no Acordo de Paris e mostrar progresso em direção à neutralidade de carbono em suas operações e normas de divulgação (CHEREPOVITSYNA et al., 2023).

Segundo Cherepovitsyn e Rutenko (2022), a importância crescente da agenda das mudanças climáticas é um pré-requisito fundamental para a transformação do setor energético global de base fóssil para carbono zero até 2050, e implica o desenvolvimento de um novo tipo de crescimento econômico baseado nos princípios do desenvolvimento sustentável. Os combustíveis fósseis estão perdendo sua posição no mercado para as energias renováveis, como a energia eólica, solar, a energia das ondas, os biocombustíveis, o hidrogênio verde, etc. Face às crescentes preocupações climáticas e ao desenvolvimento intensivo do setor das energias renováveis, as empresas de petróleo e gás precisam desenvolver estratégias não só para cumprirem as novas regras do jogo, mas também para se beneficiarem delas.

As energias renováveis são consideradas as melhores soluções em termos de confiabilidade, acessibilidade e responsabilidade ambiental. Adicionalmente, a transição para

as energias renováveis pode proporcionar um efeito socioeconômico significativo, com aumento do emprego, do bem-estar e do produto interno bruto global. Hoje, a descarbonização está se tornando parte integrante das atividades de qualquer empresa de petróleo e gás. Falta equilíbrio entre discurso e ação, mas há uma série de direções nas quais as empresas podem avançar. No entanto, não existe uma estratégia perfeita, sendo difícil encontrar uma abordagem que seja ótima para todas as empresas do setor, tanto em termos de redução de emissões como de eficiência econômica (CHEREPOVITSYN; RUTENKO, 2022).

De acordo com Sani et al. (2021), as principais economias do mundo têm progressivamente estabelecido metas ambiciosas de descarbonização, elaborando planos e implementando medidas para limitar as suas emissões, especialmente no setor energético, como a China, os EUA e a Índia. Nos últimos anos, a literatura científica tem-se centrado cada vez mais nas vias de descarbonização para economias emergentes e dependentes do carvão mineral. Na região do Sudeste Asiático, por exemplo, existe um consenso científico crescente sobre a necessidade de os países tomarem medidas ousadas para enfrentar os impactos das suas economias com utilização intensiva de carbono e acelerar a transição energética.

Com base em dados do Balanço Energético Nacional à respeito da matriz energética brasileira, publicado pela EPE (2023), o ano de 2022 foi marcado pela redução da geração termelétrica, com destaque para a redução do uso de gás natural, carvão e derivados de petróleo. O setor petrolífero pertence ao setor energético, o qual representa indústrias que transformam energia primária em energia secundária (por exemplo, transformação do petróleo em gasolina, óleo diesel, querosene e outros derivados na refinaria) e esse processo também consome energia. Contudo, menos energia foi utilizada para transformação no Brasil no ano de 2022, em relação a 2021. De 24,9 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep) em 2021, para 23,5 milhões de tep em 2022.

Na Figura 1, pode-se observar a matriz energética do setor energético, disponível no Balanço Energético Nacional. Nesse setor, a energia é consumida nos Centros de Transformação e/ou nos processos de extração e transporte interno de Produtos Energéticos, em sua forma final (EPE, 2023).

Figura 1 – Matriz Energética do Setor Energético

	10 ³ tep (toe)										
FONTES	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	SOURCES
GÁS NATURAL	4.722	5.613	5.325	5.528	5.297	6.060	5.277	4.986	4.718	4.345	NATURAL GAS
BAGAÇO DE CANA	12.241	12.466	13.155	12.237	11.926	14.296	15.139	14.038	12.875	12.084	SUGAR CANE BAGASSE
ÓLEO DIESEL	737	801	824	645	570	557	560	502	510	582	DIESEL OIL
BIODIESEL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	BIODIESEL
ÓLEO COMBUSTÍVEL	370	311	242	203	177	169	124	111	135	116	FUEL OIL
GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO	78	5	29	1	26	0	0	0	0	0	LIQUEFIED PETROLEUM GAS
NAFTA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	NAPHTHA
QUEROSENE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	KEROSENE
GÁS DE COQUERIA	187	187	188	206	202	209	190	175	207	172	COKE OVEN GAS
GÁS CANALIZADO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	GASWORKS GAS
COQUE DE CARVÃO MINERAL / ALCATRÃO/ CARVÃO VAPOR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	COAL COKE/TAR/STEAM COAL
ELETRICIDADE	3.147	3.171	3.200	3.033	3.086	3.205	3.339	3.296	3.342	3.079	ELECTRICITY
OUTRAS SECUNDÁRIAS DE PETRÓLEO	3.596	3.985	3.956	3.567	3.698	3.165	3.089	3.210	3.076	3.118	OTHER OIL PRODUCTS
TOTAL	25.079	26.540	26.919	25.419	24.983	27.660	27.718	26.317	24.863	23.496	TOTAL

Fonte: EPE (2023)

Pela figura, nota-se que o bagaço de cana é a fonte energética prioritária no setor energético. O consumo de bagaço de cana-de-açúcar no setor de energia foi reduzido em 0,8 milhão de tep, o que representou uma queda de 6,1% do seu consumo em relação a 2021. Isso se deve principalmente à retração na produção de etanol no setor sucroalcooleiro verificada em 2022. A redução na produção de etanol esteve relacionada principalmente aos impactos das condições climáticas na safra 2021/22, além da manutenção de preços atrativos do açúcar no mercado internacional (EPE, 2022).

O gás natural é a segunda fonte energética mais utilizada no setor energético, seguida por outras fontes secundárias de petróleo (gás de refinaria, coque e outros). Contudo, o consumo de gás natural no setor energético sofreu redução de 7,9% em relação a 2021, queda ainda maior do que a registrada no uso de bagaço de cana. Por outro lado, o consumo dos derivados de petróleo verificado em 2022 sofreu um pequeno aumento frente à 2021. As fontes derivadas de petróleo englobam o óleo diesel, o óleo combustível e outras fontes secundárias de petróleo. Somando-as, 3,72 milhões de tep foram consumidas em 2021 e 3,82 milhões de tep em 2022, um aumento aproximado de 2,5%.

Desde 2019, o consumo de bagaço de cana no setor energético vem apresentando queda ao longo dos anos. No que tange o período 2019 - 2022, a redução foi ampla, de 20%. O uso de gás natural como fonte energética também tem apresentado queda desde 2018, com

uma redução de 28%, ainda maior se comparada com o bagaço de cana. Em contraste, a utilização de outras fontes secundárias de petróleo no setor energético vem apresentando certa estabilidade ao longo do tempo, com valores similares de consumo durante os anos de 2013 à 2022.

Ainda, pode-se observar pela figura 1 que o consumo total de energia pelo setor energético tem apresentado queda desde o ano de 2019. Essa tendência está diretamente relacionada com a redução no consumo das duas fontes de energia mais utilizadas pelo setor energético ao longo dos anos: bagaço de cana e gás natural. O uso de óleo diesel, óleo combustível, gás de coqueria e eletricidade como fontes de energia do setor permaneceu sem grandes modificações no decorrer do período 2021 - 2022.

De acordo com a EPE (2024), o segundo semestre de 2023 foi marcado pela produção nacional recorde de petróleo e gás natural, quando o país passou por um período de crescimento do setor e de anúncio de novos investimentos. As empresas sinalizaram a intenção de reestruturar algumas atividades, à luz das estratégias de descarbonização. Paralelamente, o setor público entregou a reforma tributária como um marco importante para o desenvolvimento do país e desenvolveu políticas destinadas a promover a abertura do mercado e a competitividade no setor. Vale ressaltar que, mesmo diante de um cenário geopolítico turbulento, com a eclosão de conflitos no Oriente Médio, os combustíveis, acompanhando os preços do petróleo, registraram quedas de preços.

É importante salientar que, apesar da provável diminuição da utilização de petróleo a fim de que sejam atingidas metas climáticas, é possível que este recurso continue a ser utilizado até 2050, mesmo sob objetivos climáticos rigorosos. Os setores que ainda continuarão a depender do petróleo durante as próximas décadas incluem a aviação e o transporte marítimo, nos quais as tecnologias e práticas operacionais de baixo carbono ainda são um desafio, e o setor petroquímico. Além disso, existem unidades de processo em refinarias que são apropriadas para o processamento de matérias-primas renováveis. Assim, concentrar-se em produtos para os setores da aviação, transporte marítimo e petroquímico, bem como a adoção de matérias-primas renováveis, poderá trazer resiliência ao setor petrolífero (BERGMAN-FONTE et al., 2023).

As emissões de dióxido de carbono relacionadas à energia aumentaram acentuadamente nas últimas décadas devido à crescente demanda e consumo de energia dos países membros da OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico) e economias emergentes, como China, Índia, Brasil e África do Sul. Em 2020, as emissões de CO₂ relacionadas à energia representaram aproximadamente 31,5 GtCO₂ (bilhões de toneladas de CO₂), ou mais de 75% do total das emissões globais de CO₂ (EMENEKWE et al., 2022).

A Contribuição Nacionalmente Determinada (*Nationally Determined Contribution* ou NDC) do Brasil, prometida no Acordo de Paris, marcou uma nova etapa na política climática do país para fortalecer o desenvolvimento econômico de baixo carbono além do

compromisso de cortes drásticos nas emissões do desmatamento. O Brasil pretende, especialmente, limitar o consumo de petróleo impulsionado pelo crescimento econômico futuro, e aumentar a eficiência energética e o uso de biocombustíveis no setor de transporte. Por outro lado, o Brasil ainda aspira a se tornar uma importante província petrolífera, devido às suas enormes reservas de petróleo do Pré-sal (LEFEVRE; WILLS; HOURCADE, 2018).

Ainda segundo Lefevre, Wills e Hourcade (2018), com o mesmo nível de produção de petróleo, uma descarbonização doméstica mais profunda, desencadeada por preços adicionais de carbono e medidas de eficiência sustentável, parece alcançável com uma perda muito pequena do Produto Interno Bruto (PIB) e exportações significativas de petróleo, ao mesmo tempo em que está alinhada com uma trajetória para limitar o aumento da temperatura média global a 1,5°C. No entanto, as exportações extras de petróleo podem induzir emissões líquidas adicionais fora do Brasil. Além disso, a estratégia de crescimento econômico baseada em altas exportações de petróleo pode impedir a necessária diversificação da economia brasileira. Logo, as metas de desenvolvimento de baixo carbono irão interagir fortemente com a política de petróleo no Brasil.

3.2 Setor de Mineração

Segundo Bastos (2018), a mineração no Brasil inclui a indústria extrativa mineral, que compreende a exploração de minas, garimpos, minerais para construção civil e complexos hídricos minerais. Os produtos minerais se constituem em *commodities* econômicas e agregados para a construção civil. Portanto, a mineração tem efeito multiplicador na economia, pois parte da produção mineral é convertida em insumos para as indústrias de transformação e de construção.

O setor mineral compreende as etapas de geologia, mineração e transformação mineral. No Brasil, embora existam pequenas e médias empresas no setor, as grandes corporações possuem mais visibilidade. São elas: Vale, ArcelorMittal, Companhia Siderúrgica Nacional, Anglo American, Anglo Ferrous, Samarco, Ferrous Resources e Votorantim Metais. A Vale é responsável por mais da metade da produção de minério de ferro do país (SANTIANO, 2016).

A mineração de ferro, assim como o setor mineral como um todo, tem grande importância socioeconômica no Brasil. A indústria extrativa representa 3,7% do PIB nacional e a indústria extrativa mineral 1,4% do PIB do país. A exportação de minério de ferro em 2017 foi responsável por cerca de 13,22% das exportações brasileiras de bens primários. Vale ressaltar que o setor está interligado como base de diversas cadeias produtivas da indústria brasileira, como a indústria automobilística, eletrodomésticos, construção civil, petroquímica, naval, entre outras (SOUZA, 2020).

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (2022), a produção do setor de mineração no Brasil passou de 1,073 bilhão de toneladas em 2020 para uma estimativa de 1,150

bilhão de toneladas no ano seguinte. Em 2021, a variação dos preços das *commodities* no mercado internacional impulsionou a receita do setor em 62% em relação a 2020, passando de R\$ 209 bilhões para R\$ 339 bilhões. Informações do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) mostram que Minas Gerais foi o estado que apresentou o maior crescimento de receita em 2021: 87%, de R\$ 76,4 bilhões em 2020 para R\$ 143 bilhões. Dessa forma, o estado de Minas Gerais respondeu por 42% da receita global da indústria de mineração brasileira em 2021, seguido pela Bahia, Pará, Goiás, Mato Grosso e São Paulo.

Dados oficiais do Governo Federal indicam que foram criados 14.869 empregos no ramo, de janeiro a novembro de 2021. Assim, em novembro daquele ano, o setor de mineração registrou mais de 200 mil empregos diretos. Ainda segundo o Ministério de Minas e Energia (2022), estão previstos no setor investimentos superiores a US\$ 41 bilhões até 2025, sendo cerca de US\$ 6 bilhões em projetos socioambientais. Outras ações e iniciativas socioambientais, correspondentes a mais de 50 temas, serão realizadas pelo setor até 2030, com aportes superiores a US\$ 18 bilhões.

A mineração tem sido uma atividade central na economia brasileira desde suas origens no século XVIII. A evolução técnica e produtiva do setor durante a segunda metade do século XX permitiu ao Brasil aproveitar um cenário extremamente favorável no mercado internacional. O aumento dos preços das *commodities*, principalmente devido à procura chinesa, foi um dos principais impulsionadores do crescimento do setor. A indústria mineral brasileira é altamente dependente de fornecedores internacionais, especialmente aqueles envolvidos em tecnologias mais avançadas. Com isso, a participação do país nos indicadores tecnológicos mundiais do setor é bastante pequena: dados da Organização Mundial da Propriedade Intelectual mostram que a participação brasileira no total mundial de patentes de mineração é inferior a 1% (GARCIA; SANTOS; SUZIGAN, 2020).

Ainda de acordo com Garcia, Santos e Suzigan (2020), a especialização produtiva e as interações entre indústria e universidades não foram suficientes para levar o país a alcançar alto desempenho tecnológico na mineração. Algumas evidências para essa afirmação são que mais de 90% dos pedidos de patentes em tecnologia de mineração no Brasil durante o período de 2000 a 2015, que envolvem equipamentos de mineração, tecnologia e fornecedores de serviços, são provenientes do exterior. Os problemas institucionais revelaram-se como forças importantes que impediram a política industrial de atingir seu objetivo principal de aumentar os gastos privados em P&D no Brasil e, assim, proporcionar um processo mais amplo de construção de capacidades técnicas e de atualização tecnológica na indústria brasileira.

O processo de implementação de uma empresa de extração mineral envolve diversas interações sociais entre diferentes indivíduos e grupos de interesse. Como atividade econômica e social, a mineração viabiliza empreendimentos que geram expectativas, mobilizam interesses e atendem às necessidades dos diversos *stakeholders*: empresários, ambientalistas, empresas fornecedoras de bens e serviços, representantes do Poder Público, estudantes

e integrantes do setor produtivo. Os grupos de interesse são uma dimensão fundamental da implementação de um empreendimento no setor mineiro (NETO; BORGES, 2019).

Hilson e Hu (2022) introduziram recentemente uma nova perspectiva de que a mineração em pequena escala é uma “plataforma para a criação de riqueza”. Essa narrativa visa responder às críticas de que a mineração em pequena escala é motivada unicamente pelo desejo de escapar à pobreza ou de obter ganhos financeiros rápidos, apesar do segmento considerável da população da África Subsaariana que recorre à mineração em pequena escala como forma de aliviar a pobreza. Para muitos desses indivíduos, os meios de subsistência estão intrinsecamente ligados à extração mineral. Contudo, à medida que se adaptam aos desafios da economia informal e adquirem as competências necessárias, alguns deles conseguem acumular riqueza, empregar trabalhadores e até explorar oportunidades financeiras dentro do setor (OBODAI; MOHAN; BHAGWAT, 2023).

Segundo Alfar, Elheddad e Doytch (2023), o setor mineiro pode atrair IED (Investimento Estrangeiro Direto) através de conflitos, assim como ocorreu no conflito do Iraque. Os EUA, Reino Unido, França, Irã, Líbano, Turquia, Emirados Árabes Unidos e outros países começaram a investir na exploração de carvão, petróleo e gás natural, além de metais no Iraque durante o período de conflito. Os maiores investimentos no setor mineiro no Iraque durante o período 2003-2016 foram do Líbano, no interesse da empresa petrolífera Make, com um investimento de 3 bilhões de dólares americanos e dirigido ao subsetor das refinarias de petróleo em Dahuk. Cerca de 45% desses investimentos ocorreram nos primeiros 5 anos da guerra, que surgiu em 2003.

Há também a possibilidade de um impacto negativo do conflito sobre o IED no setor mineiro, para os países ricos em recursos. O conflito pode deter o investimento estrangeiro neste setor, prejudicando potencialmente o desenvolvimento econômico e a extração de recursos. Os investidores podem ser mais cautelosos e seletivos quando consideram investimentos em áreas propensas a conflitos, o que pode afetar a distribuição dos fluxos de capital globais. Este comportamento de investimento específico é uma prova da aversão ao risco dos investidores. No entanto, os investidores podem ter interesse em investir quando surge um conflito num país e as decisões de investimento são motivadas por outros fatores. Um desses fatores importantes são os ganhos potenciais, que atraem investimentos propensos ao risco (ALFAR; ELHEDDAD; DOYTCH, 2023).

De acordo com Gentil et al. (2019), há uma grave contradição entre os proclamados benefícios econômicos gerados para as localidades onde a indústria extrativa mineral está instalada e subsiste historicamente, e os resultados registrados em estudos, que apontam sérios problemas e consequências negativas decorrentes de sua questionável forma de gestão. Especialmente em cidades mineiras altamente dependentes ou monoindustriais, a especialização pode eventualmente levar a um declínio no bem-estar social.

De acordo com Saes et al. (2021), a notável má reputação social e ambiental do setor de mineração levou à discussão da RSC (Responsabilidade Social Corporativa) por parte de

grandes empresas no final dos anos 1990. Após se articularem durante o Fórum Econômico Mundial de 1999, grandes mineradoras multinacionais criaram o Conselho Internacional de Mineração e Metais ou *International Council on Mining and Metals* (ICMM), definindo princípios e diretrizes de boas práticas na mineração a serem seguidos por mineradoras e associações participantes. A partir dessas iniciativas, a mineração tornou-se um setor muito ativo em práticas de RSC. Ao mesmo tempo, essa articulação global do setor também ampliou o poder político dessas corporações e a influência sobre organizações internacionais e instituições governamentais nos países onde operam.

A mineração é vital para a subsistência humana e um setor crucial na economia dos Estados. No entanto, os seus impactos no ambiente e na biodiversidade não podem ser subestimados e são poderosos para atrair a atenção dos governos, visto que o ambiente e a vida selvagem estão sujeitos aos impactos nocivos da mineração e atividades relacionadas. A mineração é um negócio atraente: não só as empresas mineiras ganham, mas os governos também fazem dinheiro com impostos e licenças. A economia de um país pode se basear na extração de metais preciosos, que fornece ao governo receitas significativas durante a tributação (REHMAN et al., 2024).

Ainda segundo Rehman et al. (2024), os resultados da mineração no meio ambiente podem ocorrer nos níveis local, regional e internacional, através de práticas diretas e indiretas. Os impactos podem resultar em erosão, deslizamentos de terra, falta de biodiversidade ou poluição do solo, das águas subterrâneas e superficiais através de compostos químicos lançados pelos sistemas mineiros. A mineração e atividades relacionadas são uma das principais causas da degradação ambiental. Além da mineração, grandes extensões de floresta e *habitat* de flora e fauna têm sido utilizadas para agricultura, indústria, ferrovias e assentamentos humanos, causando devastação, fragmentação e perda de *habitat*.

Os impactos relacionados com o uso da terra e os impactos ambientais que afetam a saúde humana e os direitos humanos parecem ser os aspectos sociais mais preocupantes no setor mineiro. Por outro lado, os benefícios provenientes da renda e do emprego são os principais impactos positivos identificados. O desafio para a avaliação da sustentabilidade é a avaliação da contribuição do setor mineiro para a sociedade, para além do mero valor econômico acrescentado. A criação de empregos (tanto no setor mineiro como indiretamente em outros setores) é um impacto positivo da atividade mineira documentado em vários estudos, tanto a nível local como nacional (MANCINI; SALA, 2018).

Ainda de acordo com Mancini e Sala (2018), as oportunidades educacionais oferecidas pelas empresas e o desenvolvimento de habilidades dos funcionários são outros resultados positivos potenciais. Os impactos negativos estão relacionados com a ocorrência de trabalho infantil, forçado e obrigatório, mas também com a qualidade dos empregos (incluindo condições de trabalho precárias e perigosas, salários baixos, impactos na saúde, acidentes e mortes, habitação precária fornecida aos trabalhadores, falta de liberdade na organização das atividades sindicais). Até mesmo o aumento do desemprego pode ser considerado,

explicado pela crescente mecanização das operações mineiras.

Em setembro de 2015, 193 Estados-membros da ONU adotaram a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, na sequência de um processo participativo global de governos, sociedade civil, setor privado e instituições de pesquisa. A sua implementação teve início em janeiro de 2016, dando continuidade à Agenda de Desenvolvimento do Milênio (2000-2015) e alargando o seu âmbito. A Agenda 2030 inclui o desenvolvimento econômico; fim da pobreza, miséria e fome; inclusão social; sustentabilidade ambiental; e boa governança a todos os níveis, incluindo a paz e a segurança (COUTO; RANGEL, 2023).

Segundo Castro (2019), os acordos estão presentes em 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), e 169 metas de ação globais a serem alcançadas até 2030. No entanto, a maioria dessas metas é puramente qualitativa, deixando muito espaço para interpretação. Segundo o IBRAM (2017), o setor de mineração foi considerado prioritário pela ONU na busca pelo cumprimento da Agenda 2030. A forte contribuição para o desenvolvimento econômico e os impactos socioambientais causados pela mineração tornam o setor de grande importância para que o desenvolvimento sustentável seja atingido.

Como a mineração possui atividade temporária e causa impactos socioambientais significativos, os *stakeholders* acabam por exigir diversas ações do setor, abrangendo as áreas de saúde, educação, infraestrutura, etc. As mineradoras têm atendido a essas demandas assumindo o papel de agentes de transformação, porém, elas reconhecem que às vezes vão além de suas responsabilidades. São necessárias discussões com as partes interessadas para conscientizá-las sobre as responsabilidades de cada grupo. Com fronteiras bem definidas e cada agente cumprindo seu papel, avanços rumo ao desenvolvimento sustentável poderão ser alcançados (CASTRO, 2019).

De acordo com Kallai (2021), em suma, o setor é ao mesmo tempo parte do problema e continuará enfrentando pressões de governos, investidores e sociedade para reduzir suas emissões; uma potencial vítima das consequências das mudanças climáticas, como impactos decorrentes de climas extremos, fortes chuvas, secas e altas temperaturas cada vez mais frequentes e intensas; e importante fornecedor de matéria-prima para tecnologias mais avançadas voltadas para a necessária mitigação das mudanças climáticas.

No setor de mineração energética global, mesmo que se espere que o processo de descarbonização desacelere, diminua ou mesmo pare a queima de combustíveis fósseis, ela ainda permanece uma necessidade. Até à conquista da independência energética pelos países, é preferível, primeiramente, encontrar uma alternativa energética em detrimento do simples encerramento das centrais termoelétricas e parada da queima de combustíveis fósseis. Essa é uma oportunidade para as regiões ricas em combustíveis fósseis e especialmente carvão mineral. O principal desafio no setor de mineração energética surge na perspectiva do cumprimento dos requisitos ambientais, o que significa, por exemplo, que a utilização de carvão betuminoso é preferível em termos de menores cargas ambientais face à utilização de linhito (REZMERITA et al., 2022).

Com base em dados do Balanço Energético Nacional, publicado pela EPE (2023), o setor industrial apresentou um aumento de 1,3 milhão de tep em valores absolutos no seu consumo de energia em 2022, passando de 85,6 milhões de tep no ano de 2021 para 86,9 milhões de tep em 2022. O setor de mineração pertence ao setor industrial, mais especificamente ao de mineração e pelotização, o qual consiste na pesquisa, exploração, extração e beneficiamento dos minérios presentes no subsolo. Além disso, também engloba o processo de transformação de finos de minério de ferro em pelotas esféricas por aglomeração e endurecimento.

Na Figura 2, é possível observar a matriz energética do setor de mineração e pelotização, disponível no Balanço Energético Nacional.

Figura 2 – Matriz Energética do Setor de Mineração e Pelotização

FONTES	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	10 ³ tep (toe)
GÁS NATURAL	634	707	657	410	416	435	310	224	262	272	NATURAL GAS
CARVÃO MINERAL E COQUE DE CARVÃO MINERAL	452	431	478	286	289	321	236	167	179	166	COAL / COAL COKE
LENHA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	FIREWOOD
ÓLEO DIESEL	376	400	367	358	340	327	335	339	394	424	DIESEL OIL
BIODIESEL	18	22	26	25	27	33	36	40	45	44	BIODIESEL
ÓLEO COMBUSTÍVEL	203	166	166	152	84	86	119	116	92	133	FUEL OIL
GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO	38	28	22	41	38	35	25	31	33	33	LIQUEFIED PETROLEUM GAS
QUEROSENE	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	KEROSENE
ELETRICIDADE	1.018	1.057	1.096	1.017	1.075	1.136	1.032	1.017	1.094	1.012	ELECTRICITY
CARVÃO VEGETAL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	CHARCOAL
COQUE DE PETRÓLEO	506	544	533	423	386	362	323	207	196	182	PETROLEUM COKE
TOTAL	3.246	3.357	3.345	2.712	2.655	2.736	2.418	2.141	2.297	2.265	TOTAL

Fonte: EPE (2023)

Por meio da figura, nota-se que a eletricidade é a fonte energética prioritária no setor de mineração e pelotização. O mesmo se aplica ao setor industrial em geral, mantendo-se quase constante a quota de eletricidade nos anos 2021/2022: 21,4% e 21,6%, respectivamente. Em valores absolutos, crescimento de 18,4 milhões de tep em 2021 para 18,8 milhões de tep em 2022. Já no setor de mineração e pelotização, 44,7% do consumo energético vem da eletricidade. Contudo, o uso de eletricidade no setor foi reduzido em 0,08 milhão de tep, o que representou uma queda de 7,5% do seu consumo em relação a 2021. Isso pode estar relacionado ao desempenho da indústria da mineração em 2022 inferior ao

de 2021, muito em função da menor demanda por minério de ferro pela China e redução no preço dessa *commodity* (IBRAM, 2023).

O óleo diesel é a segunda fonte energética mais utilizada no setor de mineração e pelotização, seguida pelo gás natural. O consumo de óleo diesel no setor aumentou 7,6% em relação a 2021, em contramão do registrado no uso de eletricidade. Adicionalmente, o consumo de gás natural verificado em 2022 sofreu um pequeno aumento frente à 2021: de 0,01 milhão de tep ou 3,8%. O gás natural, utilizado em diversos segmentos industriais, teve um consumo energético superior ao de 2021 em 5% no setor industrial (EPE, 2023).

O consumo de eletricidade no setor de mineração e pelotização vem apresentando certa estabilidade ao longo do tempo, com valores similares de consumo durante os anos de 2013 à 2022. Por outro lado, desde 2018, o uso de óleo diesel como fonte energética tem apresentado um aumento ao longo dos anos. No que tange o período 2018 - 2022, o acréscimo foi amplo, de 29,7%. A utilização de gás natural no setor de mineração e pelotização também vem apresentando acréscimo desde 2020, com um aumento de 21,4%.

Ainda, pode-se observar pela figura 2 que o consumo total de energia pelo setor de mineração e pelotização tem apresentado estabilidade nos últimos anos, com valores abaixo de 3 milhões de tep desde 2016. Essa tendência está diretamente relacionada com a estabilidade no consumo da fonte de energia mais utilizada pelo setor de mineração e pelotização ao longo dos anos: a eletricidade. O uso de biodiesel, óleo combustível, gás liquefeito de petróleo, querosene, coque de petróleo, carvão mineral e coque de carvão mineral também permaneceu sem grandes modificações no decorrer do período 2021 - 2022.

No horizonte do PDE 2030 (Plano Decenal de Expansão de Energia), estima-se que os ganhos de eficiência energética na indústria brasileira permitam reduzir cerca de 6% de seu consumo energético total em 2030, o que equivale a evitar o consumo de aproximadamente 8 milhões de tep. Em termos de consumo de eletricidade, a estimativa é que os ganhos de eficiência elétrica contribuam na redução de 3% em 2030, ou cerca de 12 TWh (bilhões de kWh), equivalente ao consumo elétrico observado nas indústrias de mineração e pelotização em 2019 (EPE, 2021).

Espera-se que o setor industrial atinja o montante de 100 milhões de tep em 2030, 13 milhões de tep a mais do que o consumo energético registrado em 2022. Em termos de crescimento, destacam-se os segmentos de fertilizantes, soda-cloro, alumínio, celulose e mineração e pelotização – com redução da ociosidade da capacidade instalada e expansão da capacidade, em alguns casos. São esperadas poucas mudanças nas fontes de energia, porém com uma maior participação de fontes de baixa emissão de gases de efeito estufa, entre elas a eletricidade e derivados da cana (EPE, 2021).

Visto que o óleo diesel é a segunda fonte energética mais utilizada no setor de mineração e pelotização, as emissões de gases de efeito estufa associadas à queima de diesel tornaram-se um impacto ambiental preocupante para as operações de mineração. Sistemas de energias renováveis, como turbinas eólicas e energia solar fotovoltaica, podem servir

como soluções alternativas para mitigar este problema. Dada esta forte dependência dos combustíveis fósseis, qualquer redução substancial da pegada de carbono exige mudanças significativas na política energética (KALANTARI; SASMITO; GHOREISHI-MADISEH, 2021).

As empresas mineiras estão compensando a sua pegada de carbono através da adoção de estratégias mais ecológicas e do fornecimento de energia mais limpa para as suas operações mineiras. Esta dependência do carbono é ainda mais ousada em minas remotas, onde a falta de acesso à rede elétrica e aos gasodutos de gás natural as torna dependentes exclusivamente de combustíveis fósseis para satisfazer as suas necessidades energéticas, incluindo todas as formas de eletricidade, transporte e calor. Dada a escala destas emissões de carbono, o setor mineiro procura continuamente soluções inovadoras para dissociar o seu fornecimento de energia dos combustíveis fósseis e até adota um objetivo mais ambicioso de descarbonização total nos últimos anos (KALANTARI; SASMITO; GHOREISHI-MADISEH, 2021).

Segundo Pelissari et al. (2023), o setor da produção de eletricidade está no centro das discussões, bem como a utilização dos combustíveis fósseis. Neste cenário, o carvão mineral é amplamente utilizado como uma das principais fontes de energia do mundo devido aos seus enormes recursos distribuídos globalmente, levando a emissões de CO₂ em grande escala. A descarbonização dessa fonte é um grande desafio, considerando que os cenários energéticos de longo prazo incluem o carvão mineral nas carteiras de menor custo. Para alcançar os objetivos propostos no Acordo de Paris, 90% dos recursos de carvão devem permanecer não extraídos. Assim, a maior parte do desafio continua a ser encontrar soluções comerciais e tecnologias que possam reduzir as emissões sem comprometer a competitividade econômica do carvão.

Embora o Brasil tenha uma elevada porcentagem de geração renovável, a geração fóssil ainda desempenha um papel significativo, principalmente em períodos de má hidrologia. O consumo de energia no país está aumentando e é prevista a construção de novas usinas fósseis nos próximos anos, incluindo usinas movidas a carvão mineral. Neste cenário, a geração fóssil aumentou de 31 TWh em 2000 para 85 TWh em 2020 (+177%), com um aumento associado de 90% nas emissões de GEE no mesmo período, atingindo 32 MtCO₂e (milhões de toneladas de CO₂e) em 2020. Desta forma, encontrar soluções de descarbonização para a geração fóssil no Brasil pode reduzir as taxas de emissão do setor elétrico, o que poderia ser de relevância internacional e tomado como um exemplo global (PELISSARI et al., 2023).

De acordo com Carvalho (2014), a mineração no Brasil, assim como no resto do mundo, passa por um processo de evolução e adequação a novos paradigmas. Historicamente, o empreendimento minerário não foi limitado por questões como saúde e segurança no trabalho, articulação com a estrutura social que o cercava ou manutenção do equilíbrio ecológico do meio ambiente que o mantinha. A falta de controle levou a situações vexatórias, como

contaminação do lençol freático, acidificação do solo, implantação de processos erosivos significativos, entre outras. Partindo da hipótese de que a mineração se enquadra ora em casos de interesse social, ora em casos de utilidade pública, e que não pode ser uma atividade evitada sem prejudicar todo o sistema econômico, é fundamental garantir o respeito aos preceitos constitucionais ambientais.

Nos últimos 20 anos, o setor extrativo mineral desenvolveu um poder de influência desproporcional sobre os agentes públicos em Minas Gerais. Associado a esse fenômeno, é possível identificar uma série de mudanças na legislação ambiental estadual que fragilizaram o controle público sobre as atividades poluidoras. Essa situação ajuda a entender como dois dos maiores desastres socioambientais da história da mineração no mundo ocorreram em Minas Gerais em um curto espaço de tempo: a Samarco em 2015 e a Vale em 2019. Porém, a intensidade de tais desastres e a forte mobilização de diferentes atores sociais na reivindicação de maior controle sobre a atuação das mineradoras estabeleceu um cenário político que poderia interromper essa trajetória, pelo menos no que diz respeito às barragens de rejeitos de mineração (MILANEZ; MAGNO; PINTO, 2019).

Ainda segundo Milanez, Magno e Pinto (2019), também tem havido um papel crescente das mineradoras no financiamento de pesquisas de seu interesse, por meio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG). Dadas as restrições orçamentais do estado, ocorreram cortes recorrentes no apoio à investigação, interrompendo mesmo estudos ligados aos impactos da mineração. Nesse contexto, uma das estratégias para a manutenção de algumas investigações da FAPEMIG foi a assinatura de acordos com mineradoras, ou com entidades a elas vinculadas, como é o caso da Fundação Renova. O FAPEMIG-VALE foi especialmente criticado por representantes da comunidade científica, por definir, entre seus objetivos, apoiar projetos para o desenvolvimento de pesquisas alinhadas aos interesses da Vale S.A., do setor mineral e do estado de Minas Gerais.

Os modelos de RSC no setor mineiro têm utilizado cada vez mais relatórios de sustentabilidade ligados ao modelo de Licença Social para Operar como forma de garantir a legitimidade das suas operações. Os casos Samarco e Vale desafiam a utilização dessas estratégias ao permitir que as empresas, consideradas referência em práticas de responsabilidade social na mineração, se tornem também responsáveis por duas das maiores tragédias socioambientais do Brasil. Os modelos de RSC adotados pela Samarco e Vale priorizaram o monitoramento da percepção da imagem e reputação das empresas entre seus diversos públicos de interesse. Contudo, esta estratégia, aliada à dependência econômica dos municípios, encobriu os riscos operacionais das barragens, resultando num aumento da vulnerabilidade social da comunidade local (LOPES; DEMAJOROVIC, 2020).

Ainda de acordo com Lopes e Demajorovic (2020), uma grande questão que se coloca é se a dimensão destas tragédias representará um divisor de águas nos atuais modelos de gestão do setor mineiro que insistem em manter as variáveis sociais e ambientais como questões marginais para a tomada de decisões. O setor de mineração, no entanto, tem

pressionado por flexibilização no processo de licenciamento, como ocorreu no estado de Minas Gerais, onde as mudanças no licenciamento ambiental atenderam às demandas do setor mineral, que também vinha pressionando o governo do estado para agilizar o processo de licenciamento. Esta posição vai na direção oposta às potenciais lições aprendidas com as tragédias, tanto para as empresas como para o setor público, perpetuando uma situação de vulnerabilidade em territórios onde estão localizadas inúmeras empresas mineiras.

A água também tem sido objeto de enormes demandas para as atividades mineradoras na Bahia e em Minas Gerais, além de ser demandada para a produção de grãos e pecuária, fruticultura irrigada e expansão do setor hidrelétrico. Logo, torna-se necessário promover a discussão em torno de alternativas a um modelo de crescimento que leve ao aumento da escassez de água e dos conflitos, e que em breve poderá resultar em graves consequências, dificultando o direito à água potável a um custo acessível para uma parte significativa dos brasileiros (PEIXOTO; SOARES; RIBEIRO, 2022).

Segundo o MIT Technology Review (2023), cerca de 7,5 bilhões de toneladas de carvão foram extraídas globalmente em 2021. As estimativas para a quantidade máxima anual de materiais que serão necessários para construir infraestruturas energéticas de baixas emissões chegam a cerca de 200 milhões de toneladas, incluindo todo o cimento, alumínio, aço e até mesmo vidro que serão necessários. Assim, no total, em comparação com a dependência de combustíveis fósseis, uma transição para energias renováveis significa menos material a sair do solo e menos poluição climática sob a forma de emissões.

Logo, pode-se afirmar que emissões serão geradas pela construção de novas infraestruturas energéticas, mas muitas mais serão evitadas ao não queimar combustíveis fósseis. Ainda de acordo com o MIT Technology Review (2023), as emissões de gases com efeito de estufa geradas pela construção de infraestruturas de energias renováveis podem atingir um máximo de 29 bilhões de toneladas. Hoje, isso representa menos de um ano de emissões globais de combustíveis fósseis. E o resultado poderá ser ainda melhor se houver redução das emissões provenientes da produção de aço e cimento ou a definição de programas fortes de reciclagem para alguns materiais essenciais.

3.3 Setor Siderúrgico

Segundo o Conselho Administrativo de Defesa Econômica (2022), a siderurgia é um ramo específico da metalurgia, que consiste na atividade de extrair metais de seus respectivos minérios, preparando-os para diversos usos. Ambas são indústrias que produzem metal, a diferença é o tipo de metal produzido por elas. Enquanto a metalúrgica atua em um campo mais amplo, produzindo diferentes tipos de metais (como alumínio e cobre), a siderúrgica atua exclusivamente na produção de ferro e aço.

A indústria siderúrgica é um setor muito sensível ao desempenho da indústria como um todo, sendo afetada diretamente pelo nível de atividade econômica e pelo nível de investimento. Também é sensível ao câmbio, que afeta alguns insumos do processo pro-

duto, como carvão e coque, e às exportações. Os produtos siderúrgicos são produtos intermediários, utilizados principalmente pelas indústrias de bens de capital, automotiva e de construção civil (CADE, 2022). De acordo com o Instituto Aço Brasil (2024), a siderurgia no país, representada por 15 empresas privadas, controladas por onze grupos empresariais e operando 31 usinas espalhadas por 10 estados brasileiros, foi responsável pela produção, em 2022, de 34,1 milhões de toneladas de aço bruto, levando o país a ocupar a 9^a posição no *ranking* mundial de produção.

A comparação entre importações e exportações de 2010 a 2020 reforça a posição do Brasil como exportador de produtos siderúrgicos: as exportações cresceram 17% e, no mesmo período, as importações caíram 65%. Observa-se também que tanto a capacidade instalada quanto a produtividade das siderúrgicas nacionais têm crescido ao longo dos anos. A capacidade passou de 44,6 milhões de toneladas/ano em 2010 para 51 milhões de toneladas/ano em 2020. A produtividade saltou de 343 para 401 toneladas por homem por ano de 2010 a 2020. Sendo assim, é possível traçar um paralelo com o aumento das exportações e concluir que ambos os movimentos foram direcionados ao mercado externo, uma vez que tanto as vendas internas quanto o consumo aparente declinaram no mesmo período (CADE, 2022).

Ainda segundo o Conselho Administrativo de Defesa Econômica (2022), analisando as especificidades da indústria siderúrgica brasileira, observa-se que o Brasil apresenta alguns pontos fortes quando comparado a outros países produtores de aço. Primeiro, o minério de ferro brasileiro é altamente competitivo no mercado internacional, devido ao seu alto teor de ferro e baixo custo. A mão de obra também é mais barata do que em outros países produtores. Além disso, as principais siderúrgicas estão localizadas próximas aos portos de embarque e minas de minério de ferro, e todo o complexo é interligado por ferrovias especializadas no transporte de minério e aço. Como contraponto, há a escassez e a baixa qualidade do carvão mineral brasileiro, essencial ao processo produtivo.

O setor siderúrgico no país se faz presente desde o Brasil colonial, quando a produção de ferro concentrava-se basicamente na produção de insumos para atender a demanda diária e havia a preocupação de que essa tecnologia não chegasse às mãos dos povos indígenas, para que estes não produzissem armas com ferro e chegassem a representar uma ameaça aos colonizadores. Em 1810, foi fundada a Real Fábrica de Ferro de São João de Ipanema, na cidade de Sorocaba, na capitania de São Paulo, operando por 85 anos de forma intermitente. Em 1888, iniciou-se a construção do Alto-Forno da Usina Esperança, que entrou em operação em 1891 com uma produção de 5 toneladas diárias de ferro-gusa, utilizando carvão vegetal como combustível (BRINO, 2019).

De acordo com Silva (2019), na década de 1990, após a abertura econômica brasileira durante o governo Collor, as empresas siderúrgicas brasileiras passaram por um processo de reestruturação que começou com privatizações no setor. Esta privatização trouxe dois contextos diferentes para o setor siderúrgico. A primeira situação foi o crescimento da

siderurgia brasileira decorrente da entrada no mercado internacional, que levou ao aumento das exportações. Por outro lado, o segundo contexto foi o aumento da concorrência internacional e a entrada de produtos importados, principalmente produtos chineses, resultando em ameaça às indústrias brasileiras.

Entre 1994 e 2016, as siderúrgicas investiram US\$ 46,6 bilhões em modernização e atualização tecnológica das plantas, atingindo capacidade instalada de 50,4 milhões de toneladas. Diante desse investimento, o Brasil possui o maior parque industrial siderúrgico da América do Sul e é o maior produtor da América Latina (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2019). Atualmente, o parque siderúrgico brasileiro é composto por usinas administradas pelos seguintes grupos empresariais: Aperam, ArcelorMittal Brasil, CSN, Gerdau, SINOBRAS, Ternium, Usiminas, Vallourec, Villares Metals e Votorantim (SILVA, 2019).

Segundo Hebeda et al. (2023), diferente de outros países, a indústria siderúrgica brasileira é conhecida por utilizar carvão vegetal em usinas integradas. Contudo, nos últimos 15 anos, o uso de carvão vegetal diminuiu. Em 2005, o carvão vegetal representava 28% da matriz energética do aço e em 2020 diminuiu para 16%. Uma razão para esse declínio é que a produção de carvão vegetal não é tão eficiente e competitiva como a produção de carvão mineral (EPE, 2018). A biomassa sólida é utilizada principalmente para geração de calor nos setores residencial e industrial, incluindo a agricultura, todos com tendências diferentes.

No setor industrial, as indústrias siderúrgicas utilizam o coque de carvão como principal agente redutor dos altos-fornos de ferro-gusa e ligas de ferro. O carvão vegetal representa uma alternativa local para compensar parte da procura, especialmente quando os preços do coque de carvão estão elevados, bem como quando é utilizado como alternativa para gerar energia em centrais combinadas de calor e eletricidade. As perspectivas para 2027 no Brasil mostram que o consumo de carvão vegetal e lenha no setor industrial permanecerá estável nos próximos anos (CARVALHO et al., 2020). Contudo, em um cenário de mudanças climáticas, o setor poderia realizar investimentos a fim de melhorar a cadeia de produção do carvão vegetal e contribuir com uma importante medida de descarbonização.

Conforme Singh et al. (2023), a indústria siderúrgica está frequentemente exposta às condições de fabricação mais desafiadoras, como ambientes corrosivos, erosão, desgaste e altas temperaturas. Todos esses fatores afetam diretamente o desempenho operacional dos ativos, acarretando elevados custos de manutenção e perdas de produção. Nas siderúrgicas existem equipamentos cada vez mais sofisticados que estão relacionados a falhas aleatórias. De acordo com Torre, Brandalise e Bonamigo (2023), a manutenção desempenha um papel indispensável no setor produtivo de uma organização e o uso crescente de operações de alta precisão na indústria siderúrgica faz com que os sistemas hidráulicos exijam maior atenção. Logo, a estratégia de manutenção de uma organização está diretamente relacionada com os seus objetivos.

As siderúrgicas operam com equipamentos de alto custo que afetam os gastos de capital ou *Capital Expenditure* (CAPEX) e os gastos operacionais ou *Operational Expenditure* (OPEX), onde a confiabilidade operacional na planta é fundamental para um processo contínuo que funciona 365 dias por ano. O fluxo de caixa é o método mais utilizado para tomada de decisão pelos investidores e vem sendo empregado há muito tempo nas siderúrgicas. Possui como objetivo mensurar os fluxos de caixa de um determinado projeto a ser implementado, prevendo os ganhos em valor presente – VP (TORRE; BRANDALISE; BONAMIGO, 2023).

Segundo Tripathy, Kalbar e Modi (2023), com uma economia em contínuo crescimento, combinada com uma elevada população e a crescente procura de um melhor nível de vida, muitos processos industriais operam a um ritmo acelerado em países como a Índia. A grande diversificação das necessidades das pessoas está ligada aos setores da construção, indústria transformadora, transportes e energia. O setor siderúrgico é um dos setores que desempenha um papel significativo no fornecimento de matérias-primas primárias e produtos acabados para diversos outros setores.

O setor do ferro e do aço está crescendo de forma constante e a procura pelo setor está aumentando rapidamente devido à urbanização. O rápido aumento da procura está criando pressão sobre o setor para satisfazer os requisitos atuais, uma vez que novas unidades de ferro e aço exigiriam um enorme capital e um tempo de configuração significativo. Em contraste, as unidades mais antigas são tecnicamente limitadas para satisfazer a procura em rápido crescimento (TRIPATHY; KALBAR; MODI, 2023). O setor siderúrgico também possui uma grande procura por terra, visto que uma grande quantidade de terra é indireta e diretamente necessária para a aquisição e processamento de recursos, o que diminui assim a terra disponível para outras atividades econômicas (LIU et al., 2021).

Segundo Teske et al. (2022), o aço é um material importante para o setor de engenharia e construção em todo o mundo, sendo também utilizado em eletrodomésticos de uso diário nos níveis doméstico e industrial. Cerca de 52% da utilização do aço é para edifícios e infraestruturas; 16% é utilizado para equipamentos mecânicos, como guias de construção e maquinaria pesada; 12% são destinados a automóveis; 10% a produtos metálicos, incluindo ferramentas; 5% são utilizados para outros meios de transporte, incluindo navios de carga, aviões e veículos de duas rodas; 3% são destinados a equipamentos elétricos; e 2% a eletrodomésticos. A produção global de aço é altamente concentrada e 12 empresas são responsáveis por mais de 50% da produção.

De acordo com Branca et al. (2020), a transformação digital e a Indústria 4.0 contribuíram para reduzir a necessidade de recursos físicos e muitas vezes operações pesadas e repetitivas, e para o aumento da procura de mão-de-obra altamente qualificada. Para ser mais competitivo, o setor siderúrgico visa desenvolver uma força de trabalho altamente qualificada, especializada e polivalente. No entanto, devido à escassez de competências, às dificuldades de recrutamento, e questões de gestão de talentos, é importante prever,

identificar e antecipar as necessidades de competências.

Nos próximos anos, para alcançar uma implementação bem-sucedida da digitalização, o setor siderúrgico terá de enfrentar alguns desafios importantes, como a padronização de sistemas e protocolos, a organização do trabalho e a procura por trabalhadores mais qualificados. Espera-se que a implementação da digitalização gere efeitos de produtividade nos setores industriais e de crescimento na economia. No que diz respeito às potenciais consequências da digitalização para a mão-de-obra industrial, por um lado, as novas tecnologias podem causar perdas de emprego, mas, por outro lado, podem ser alcançadas qualificações mais elevadas. No entanto, as mudanças dependerão de diversos fatores e espera-se que ocorram a médio prazo, provocando alguns impactos na força de trabalho industrial (BRANCA et al., 2020).

Segundo Rossetto (2023), o aço é um material importante usado na fabricação, construção, transporte e aplicações de consumo em todo o mundo. Em 2021, cerca de 1,9 bilhões de toneladas foram produzidas a nível mundial e estima-se que cada tonelada resulte em cerca de 2 tCO₂e de emissões de gases de efeito estufa (incluindo emissões diretas e indiretas, ou emissões de escopo 1 e escopo 2 e tendo em conta as diferenças entre países), resultando em até 9% das emissões globais. É frequentemente rotulado como um dos setores difíceis de reduzir, onde a tecnologia necessária para reduzir as suas emissões a zero não está comprovada ou é antieconômica.

Ferro e aço, produtos químicos, cimento, metais não ferrosos, papel e celulose etc. são referidos como Indústrias Intensivas em Energia ou *Energy Intensive Industries* (EII) porque usam recursos energéticos como matéria-prima primária. Um dos principais mecanismos para reduzir as emissões da União Europeia, o RCLE-UE (Regime Comunitário de Licenças de Emissão da União Europeia), limita o volume de gases com efeito de estufa que podem ser emitidos por indústrias com utilização intensiva de energia, pelos produtores de eletricidade e pelas companhias aéreas em toda a União Europeia (ROSSETTO, 2023).

A Agência Europeia do Ambiente (2021) informou que, em 2019, a UE emitiu cerca de 4.067 milhões de tCO₂e. Isto representa uma redução de 29% em relação à linha de base de 1990, rumo a uma meta provisória de redução de 55% até 2030 e eventuais emissões líquidas zero até 2050. De acordo com Bhaskar, Assadi e Somehsaraei (2019), a eficiência energética tem desempenhado um papel importante na redução da intensidade energética e das emissões do setor industrial. No entanto, somente mudanças incrementais nas atuais tecnologias de produção industrial não atingiriam as metas de redução de emissões necessárias para evitar os efeitos catastróficos das mudanças climáticas antropogênicas.

O setor de ferro e aço libera 16% das emissões industriais totais de CO₂ globalmente. Com o aumento do padrão de vida nos países em desenvolvimento, a demanda por aço crescerá ainda mais e aumentará até 2050. O aço pode ser produzido pela redução do minério de ferro ou pela reciclagem de sucata de aço em um Forno Elétrico a Arco, por

ser um material 100% reciclável, podendo ser fabricado infinitas vezes e sempre mantendo suas características. Contudo, a disponibilidade limitada de sucata e a demanda por graus especiais de aço, que não podem ser produzidos a partir da reciclagem, levariam a um aumento da demanda por produção de aço baseado em minério no futuro (BHASKAR; ASSADI; SOMEHSARAEI, 2019).

Segundo Karlsson et al. (2020), a indústria siderúrgica reduz os custos utilizados na extração e fabricação do aço ao reciclar o material descartado. Dados do Instituto Nacional dos Distribuidores de Aço (INDA) mostram que 37% do aço utilizado no mundo é fabricado a partir de sucata do mesmo material (INDA, 2021). Para a produção de aço primário, cerca de 80% das emissões de CO₂ decorrem da redução do minério de ferro. As principais opções para a redução profunda das emissões na produção de aço primário são a eletrificação com eletricidade renovável (via redução direta de hidrogênio ou eletroextração), uso de biomassa para substituir o coque como combustível e agente redutor e/ou uso de Captura e Armazenamento de Carbono (*Carbon Capture and Storage* ou CCS).

A captura parcial de CO₂ é uma tecnologia madura e de baixo custo que pode ser implementada sem grandes mudanças no processo existente e combinada com a substituição para a biomassa (KARLSSON et al., 2020). A CCS é considerada uma das alternativas mais importantes para a descarbonização dos setores energético e industrial, fazendo parte da carteira de compromissos nacionais de muitos países que assinaram o Acordo de Paris em 2016 (UNFCCC, 2020).

De acordo com Garlet et al. (2023), apesar da pequena participação de mercado, o hidrogênio verde está progressivamente tornando-se um facilitador da descarbonização global, oferecendo uma solução promissora para os desafios da transição energética. Uma das características relevantes da economia do hidrogênio verde é a sua versatilidade de aplicações. Pode ser utilizado na indústria como substituto do gás natural, do carvão para geração de calor e como insumo em setores intensivos em carbono, substituindo o hidrogênio cinza. Pode ser aplicado como matéria-prima em indústrias como siderurgia, celulose, papel, cerâmica e vidro, reduzindo emissões nesses setores desafiadores. Por exemplo, na indústria siderúrgica, o hidrogênio verde pode ser um agente redutor em Altos-Fornos, reduzindo as emissões de CO₂ na conversão de minério de ferro em aço.

Existe um grande acordo entre a comunidade científica de que as emissões antropogênicas de CO₂ precisam de ser reduzidas a zero até cerca de meados do século, a fim de serem consistentes com a meta mais ambiciosa do Acordo de Paris. No entanto, uma meta global de emissões líquidas zero não coincide necessariamente com uma meta semelhante para todos os setores. Em particular, a indústria pesada (siderurgia, metalurgia, petroquímica e de cimento) foi identificada como um setor difícil de descarbonizar, juntamente com a aviação, o transporte marítimo e a agricultura; isto deve-se a uma combinação de fatores específicos do setor: elevado crescimento projetado da atividade, opções comparativamente mais custosas de redução de emissões e lenta rotação de capital (KERAMIDAS;

MIMA; BIDAUD, 2023).

Ainda segundo Keramidas, Mima e Bidaud (2023), em suma, o setor siderúrgico representa uma parcela crescente das emissões globais de CO₂ e é considerado um setor difícil de reduzir no esforço para a descarbonização de toda a economia. O aumento da reciclagem e a forte eletrificação (até 63% da produção em 2050) são projetados como alavancas fundamentais para a redução das emissões, o que é possível graças à crescente disponibilidade de sucata de aço. Seriam necessárias políticas climáticas fortes para impulsionar o setor siderúrgico a descarbonizar-se totalmente, com a eletrificação, a captura de carbono, a biomassa e o hidrogênio, todos contribuindo. A captura de carbono seria necessária para atingir emissões líquidas zero na segunda metade do século.

Por outro lado, a fim de que outros setores da economia façam a transição energética, a produção de aço será essencial. Ainda que o setor siderúrgico continue emitindo uma parcela crescente de carbono, sem aço não é possível falar em transição energética. Nela, o aço desempenha um papel fundamental e é utilizado em várias etapas da cadeia de produção de energia limpa, como na fabricação de torres eólicas, painéis solares, tanques de armazenamento de energia, e linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Portanto, o aço é um aliado essencial na transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável.

Com base em dados do Balanço Energético Nacional, publicado pela EPE (2023), houve redução no uso do carvão mineral pela indústria em relação a 2021 devido à queda na produção de aço por redução a coque de carvão. Em 2022, a participação do carvão mineral como fonte energética na indústria foi de 12,6% (10,9 milhões de tep), enquanto em 2021 representou 13,6% (11,6 milhões de tep). A indústria siderúrgica é a maior consumidora de carvão coque (subproduto do carvão mineral), a qual utiliza o material na redução do minério de ferro a ferro metálico. Ou seja, o coque é considerado um agente redutor. O setor siderúrgico pertence ao setor industrial, mais especificamente ao de ferro-gusa e aço, o qual consiste em todos os processos que utilizam a redução de minérios de ferro para gerar o aço.

Na Figura 3, pode-se observar a matriz energética do setor de ferro-gusa e aço, disponível no Balanço Energético Nacional.

Figura 3 – Matriz Energética do Setor de Ferro-gusa e Aço

FONTES	10 ³ tep (toe)										SOURCES
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
GÁS NATURAL	1.284	1.036	1.223	1.012	1.161	1.171	1.204	1.140	1.291	1.373	NATURAL GAS
CARVÃO MINERAL	1.808	2.053	2.124	1.935	2.289	2.420	2.203	2.095	2.412	2.263	COAL
ÓLEO DIESEL	35	33	27	23	25	24	24	26	35	34	DIESEL OIL
BIODIESEL	2	2	2	2	2	2	3	3	4	3	BIODIESEL
ÓLEO COMBUSTÍVEL	40	35	2	2	3	0	2	4	3	11	FUEL OIL
GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO	19	26	25	59	43	33	24	26	29	28	LIQUEFIED PETROLEUM GAS
NAFTA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	NAPHTHA
QUEROSENE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	KEROSENE
GÁS DE COQUERIA	1.200	1.200	1.148	1.114	1.202	1.240	1.131	1.061	1.246	1.185	COKE OVEN GAS
GÁS CANALIZADO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	GASWORKS GAS
COQUE DE CARVÃO MINERAL	7.309	7.237	7.441	6.728	7.340	7.455	6.809	6.450	7.400	6.950	COAL COKE
ELETRICIDADE	1.692	1.672	1.609	1.485	1.628	1.653	1.523	1.457	1.650	1.559	ELECTRICITY
CARVÃO VEGETAL	3.021	2.962	2.988	2.490	2.622	2.773	2.900	2.874	3.013	2.895	CHARCOAL
ALCATRÃO / OUTRAS SEC. PETRÓLEO	129	133	135	119	131	132	120	113	132	124	TAR/OTHER OIL SECONDARIES
TOTAL	16.539	16.388	16.725	14.970	16.447	16.905	15.942	15.249	17.216	16.425	TOTAL

Fonte: EPE (2023)

Pela figura, nota-se que o coque de carvão mineral é a fonte energética prioritária no setor de ferro-gusa e aço. O consumo de coque de carvão mineral no setor foi reduzido em 0,45 milhão de tep, o que representou uma queda de 6,1% do seu consumo em relação a 2021. Isso pode estar relacionado à também utilização do carvão vegetal, o qual atua como combustível e redutor simultaneamente, assim como o coque. A siderurgia a carvão vegetal pode ser vista como uma alternativa de alto potencial, especialmente para o Brasil, que faz parte de um portfólio de soluções globais (CIRINEU, 2023).

O carvão vegetal é a segunda fonte energética mais utilizada no setor de ferro-gusa e aço, seguida pelo carvão mineral. O consumo de carvão vegetal no setor sofreu redução de 3,9% em relação a 2021, queda menos acentuada do que a registrada no uso de coque de carvão mineral. Adicionalmente, o consumo de carvão mineral verificado em 2022 também sofreu redução frente à 2021: de 0,15 milhão de tep ou 6,2%. No setor industrial, houve redução de 4,6% do uso de carvão mineral em relação a 2021 devido à queda na produção de aço por redução a coque de carvão mineral (EPE, 2023).

O consumo de coque de carvão mineral no setor de ferro-gusa e aço vem apresentando certa estabilidade ao longo do tempo, com valores similares de consumo durante os anos de 2013 à 2022. O uso de carvão vegetal como fonte energética também tem apresentado valores próximos desde 2013. Adicionalmente, como o consumo de carvão mineral está

diretamente relacionado ao de coque de carvão mineral, a utilização de carvão mineral no setor de ferro-gusa e aço também vem apresentando valores similares no período 2013 - 2022.

Ainda, pode-se observar pela figura 3 que o consumo total de energia pelo setor de ferro-gusa e aço tem apresentado estabilidade nos últimos anos, com valores cercados os 15 e 17 milhões de tep desde 2013. Essa tendência está diretamente relacionada com a estabilidade no consumo das três fontes de energia mais utilizadas pelo setor de ferro-gusa e aço ao longo dos anos: coque de carvão mineral, carvão vegetal e carvão mineral. O uso de gás natural, óleo diesel, biodiesel, óleo combustível, gás liquefeito de petróleo, gás de coqueria, eletricidade, alcatrão e outras fontes secundárias de petróleo também permaneceu sem grandes modificações no decorrer do período 2021 - 2022.

O carvão mineral é fonte de energia primária, assim como outros produtos energéticos fornecidos pela natureza em sua forma direta, como petróleo, gás natural, resíduos vegetais e animais, energia solar, energia eólica, etc. O coque de carvão mineral é considerado uma fonte secundária de energia, sendo um produto energético resultante da transformação do carvão mineral quando submetido a altas temperaturas na ausência de oxigênio. Os dados de produção e consumo de coque de carvão mineral no Balanço Energético Nacional são obtidos diretamente das Indústrias (CSN, Usiminas, Açominas, CST, Cosipa e outras) (EPE, 2023).

A indústria brasileira sempre dependeu fortemente de energias renováveis, principalmente carvão vegetal e outras fontes de biomassa. Como resultado da produção de aço, o país tornou-se o maior produtor e consumidor de carvão vegetal do mundo. O Brasil tem experiência no uso de carvão vegetal em processos produtivos e as políticas para mitigar as emissões de GEE têm se concentrado no uso de carvão vegetal em altos-fornos. Por outro lado, o uso de carvão vegetal nunca ultrapassou a proporção de 25% da capacidade total de produção de ferro-gusa no Brasil (32 milhões de toneladas em 2020) (CIRINEU, 2023).

As perspectivas do setor siderúrgico brasileiro na área de Meio Ambiente foram apontadas de acordo com o Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico 2010-2025, apresentado pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (2010). Segundo Batista (2014), as principais diretrizes traçadas para a gestão ambiental do setor foram o aprimoramento dos modelos de gestão empresarial, a articulação governo/sociedade/empresa, com a definição de projetos ambientais prioritários e a defesa dos interesses setoriais no cenário internacional. Em relação ao consumo de eletricidade ou gás, a diretriz foi reduzir o consumo. Para a gestão e reciclagem de resíduos sólidos, a diretriz foi aprimorar os esforços já realizados na gestão e reciclagem de resíduos.

Em dezembro de 2020, o Ministério de Minas e Energia aprovou o Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050), o qual destaca a importância de promover o uso do hidrogênio em diversos setores da sociedade a partir da geração de energia limpa para a

siderurgia, enfatizando a necessidade de um marco regulatório relacionado, entre outros, à infraestrutura de transporte, abastecimento, incentivos ao uso de novas tecnologias e articulação com instituições internacionais que já possuem iniciativas com o hidrogênio (SILVA, 2021).

De acordo com Garlet et al. (2023), o hidrogênio verde também é capaz de fornecer eletricidade para diversos setores da economia, incluindo a mobilidade, através de células de combustível. No entanto, falta uma compreensão abrangente do seu cenário no Brasil, e desafios como os elevados custos de produção e uma indústria nacional subdesenvolvida impedem a expansão do mercado. Ao promover a colaboração dos *stakeholders* e superar obstáculos técnicos, como a produção econômica em grande escala e o armazenamento eficiente, o Brasil poderia aproveitar o seu potencial no setor do hidrogênio verde, promovendo o crescimento econômico, a criação de empregos e a sustentabilidade ambiental para alcançar uma posição de liderança global. Vale ressaltar que o hidrogênio é considerado “verde” quando não gera emissões de CO₂ durante sua produção.

O Brasil é um país chave para a indústria siderúrgica: é o segundo maior produtor de minério de ferro do mundo, além de possuir uma das maiores reservas de minério de alta qualidade. A produção de aço é a principal fonte de emissões de GEE entre os setores industriais brasileiros, respondendo por aproximadamente um quarto das emissões industriais (MCTIC, 2020). Segundo Souza e Pacca (2023), no Brasil, embora a recente pandemia de COVID-19 tenha diminuído o PIB de 2019 a 2020 em quase 5%, a indústria siderúrgica não foi afetada, pois seus produtos em dezembro de 2020 aumentaram 20% em relação a dezembro de 2019. O Brasil ainda precisa de fortes investimentos em infraestrutura, sugerindo um aumento nas emissões de CO₂ provenientes da produção de aço no curto prazo.

De Souza e Pacca (2021) avaliaram o caso da siderurgia brasileira e mostraram que o potencial de redução de CO₂ do carvão vegetal em Altos-Fornos ou *Blast Furnaces* (BF) é maior do que o potencial de reciclagem de sucata, que é uma estratégia de CE (*Circular Economy* ou Economia Circular) reconhecida em países desenvolvidos com grande mercado estabelecido de produtos siderúrgicos. Também deve-se ressaltar que a geração de energia brasileira não está sob o controle da indústria. A indústria também é autoprodutora de energia elétrica, mas não é autossuficiente. Assim, para os produtores de aço, é recomendado investimentos na geração de energia local (por exemplo, eólica e solar) para corresponder à alta intensidade energética da produção de aço (SOUZA; PACCA, 2023).

De acordo com Souza e Pacca (2021), embora a reciclagem do aço seja uma estratégia de economia circular reconhecida, o *stock* de sucata nacional pode ser uma limitação para reduzir as emissões de carbono da produção de aço. No Brasil, a produção de carvão vegetal pode ser uma alternativa complementar à reciclagem para mitigação das mudanças climáticas. Uma parcela de reciclagem poderia ser utilizada, e a produção restante do alto-forno poderia ser baseada em carvão vegetal, melhorando a redução total.

O carvão vegetal apresenta custos de redução mais elevados, mas menos incerteza do que a reciclagem. São necessários regulamentos para melhorar a logística e as disparidades no mercado de sucata. Tais estratégias podem reduzir significativamente as emissões da siderurgia brasileira, adiando outras alternativas emergentes ou mais caras.

Como o fornecimento de energia brasileiro é dominado pela geração hidrelétrica, seu fator de emissão de CO₂ foi 83% inferior à média mundial em 2018 (IEA, 2020). Portanto, em comparação com outros países, a eficácia da rota EAF (*Electric Arc Furnace* ou Forno Elétrico a Arco) é alta, devido às baixas emissões geradas pela eletricidade. No entanto, a participação do EAF no aço brasileiro permanece abaixo da média mundial: 14% vs. 30% em 2017. Assim, embora a maioria dos estudos de aço de baixo carbono proponham a reciclagem como carro-chefe, o carvão vegetal via BF deve ser uma contribuição importante e complementar às estratégias de produção de aço no Brasil. Também são necessárias políticas econômicas devido aos custos adicionais do carvão vegetal, em conjunto com a aplicação da lei para garantir sua produção sustentável (SOUZA; PACCA, 2021).

Segundo Carvalho et al. (2020), o Brasil é líder global na utilização de calor renovável – principalmente devido à utilização de florestas plantadas pelo setor siderúrgico para a produção de carvão vegetal, substituto do carvão mineral. Contudo, a biomassa sólida no setor de ferro e aço possui como principais gargalos a falta de controle sobre o desmatamento, os custos mais elevados para reflorestamento e a logística do carvão vegetal. Adicionalmente, a probabilidade de ampla implantação do uso de biomassa sólida até 2030 é média e ainda há potencial para novos tipos de biomassa, como *pellets*.

Embora a via de produção no alto-forno tenha sido aproveitada no passado, existem opções mais eficientes em termos energéticos e menos intensivas em emissões. No Brasil, os minialtos-fornos utilizam integralmente o carvão vegetal para a produção de ferro, mas a substituição completa não é viável ou eficiente em termos energéticos para operações de maior escala. Devido à menor resistência mecânica da biomassa, pode diminuir a eficiência do forno e a qualidade do ferro. Adicionalmente, uma preocupação é a disponibilidade de biomassa para o setor siderúrgico e a concorrência com outros setores. Além disso, é fundamental avaliar os impactos ambientais, tais como a utilização dos solos. Logo, os desafios da utilização de biomassa estão relacionados com o nível de substituição, disponibilidade e outras consequências ambientais (JOHNSON; DENG; GENCER, 2023).

4 Planos de descarbonização

Esta seção traz informações a respeito dos planos de descarbonização das maiores empresas brasileiras nos setores petrolífero, de mineração e siderúrgico. Neles, é apresentado quais ações serão realizadas pelas empresas para reduzir as emissões de GEE. Além disso, os planos de descarbonização também compartilham quais são as metas traçadas e os prazos para que elas sejam atingidas.

4.1 Petrobras

Por muitos anos houve uma concentração significativa da produção de petróleo nas mãos da Petrobras. No entanto, nos últimos anos, essa concentração tem diminuído gradualmente com a inserção de muitas empresas de petróleo no Brasil. Apesar de não ter mais um monopólio, de acordo com Oliveira (2019), a Petrobras demonstra sua importância pela interferência nos preços, pela concentração de investimentos em refino e pela responsabilidade pelo abastecimento. Adicionalmente, em 2023, a Petrobras foi eleita pelo Merco (Monitor Empresarial de Reputação Corporativa) como a empresa com melhor reputação no Brasil na categoria Energia. A Petrobras segue no topo da categoria, ocupando o 37º lugar entre as 100 empresas mais admiradas do país (MERCO, 2024). Logo, é pertinente afirmar que a Petrobras é a maior empresa brasileira do setor Petrolífero.

É importante salientar que esta análise focou na comparação de dois planos da Petrobras: o plano estratégico 2020-2024 e o plano estratégico 2023-2027, a fim de que sejam analisadas as tendências de metas traçadas ao longo dos anos. Segundo a Petrobras (2019), uma série de ações de descarbonização já foram tomadas nos processos da empresa, que envolvem redução da queima de gás natural em *flare*, reinjeção de CO₂ e ganhos de eficiência energética.

Nesse sentido, foram estipulados dez compromissos com a agenda de baixo carbono e sustentabilidade no plano estratégico 2020-2024 (PETROBRAS, 2019). No Quadro 1, pode-se observar os dez compromissos do Plano Estratégico 2020-2024 da Petrobras. Vale ressaltar que as seis primeiras metas, relativas à temática de carbono, possuem 2015 como ano-base. Os demais compromissos são com base em 2018.

Quadro 1 – Compromissos Plano Estratégico 2020-2024 Petrobras

-
1. Crescimento zero das emissões absolutas operacionais até 2025
 2. Zero queima de rotina em *flare* até 2030
 3. Reinjeção de aproximadamente 40 milhões de tCO₂ até 2025 em projetos de CCUS
 4. Redução de 32% na intensidade de carbono no segmento de E&P até 2025
 5. Redução de 30%-50% na intensidade de emissões do metano até 2025
 6. Redução de 16% na intensidade de carbono no refino até 2025
 7. Redução de 30% na captação de água doce com foco no aumento do reuso até 2025
 8. Crescimento zero na geração de resíduos de processo até 2025
 9. 100% das instalações Petrobras com plano de ação em biodiversidade até 2025
 10. Manutenção dos investimentos em projetos socioambientais
-

Fonte: Petrobras (2019)

É possível observar, ao analisar os dois planos da Petrobras, que a temática de carbono no plano estratégico 2023-2027 se apresenta bem mais robusta do que no plano estratégico 2020-2024. Segundo a Petrobras (2023), no plano estratégico 2023-2027 da empresa, a Petrobras optou por focar e avançar na análise de novos negócios, além de priorizar os segmentos de hidrogênio, eólica e captura de carbono. Adicionalmente, considerando o alto potencial nacional de geração de créditos de base natural altamente competitivos, a Petrobras fortaleceu sua atuação em florestas e incorporou o uso de créditos de carbono como potencial complementar de descarbonização, enfatizando o foco em créditos de alta qualidade e integridade, em linha com as melhores práticas internacionais e benefícios socioeconômicos e ambientais.

Os projetos da Petrobras para redução de emissões de GEE de suas operações priorizam ganhos de eficiência energética e redução de perdas, impulsionando o desempenho operacional dos ativos para que eles atinjam seu maior potencial e sejam menos intensivos em energia. A empresa desenvolve e avalia tecnologias que permitem a substituição de combustíveis fósseis convencionais por aqueles obtidos de fontes renováveis, como biocombustíveis e energia renovável. A Petrobras também investe no desenvolvimento de tecnologias de remoção de carbono, essenciais para a remoção de emissões residuais. Paralelamente a essas ações, a empresa busca disponibilizar tecnologias avançadas para monitoramento e mitigação de emissões de metano (PETROBRAS, 2023).

Ainda segundo a Petrobras (2023), o Brasil está entre os três maiores produtores e consumidores de biodiesel no *ranking* internacional, liderança impulsionada por incentivos públicos, como o Programa RenovaBio. Somente em 2021, o uso de combustíveis renováveis no Brasil totalizou 66,9 milhões de tCO₂e em emissões evitadas em relação aos equivalentes fósseis. Priorizando o uso da infraestrutura de abastecimento existente no território, o Programa RenovaBio visa estimular o aumento da produção de biocombustíveis no país em padrões sustentáveis e contribuir para o cumprimento das metas de redução de emissões.

A Petrobras também concluiu a adaptação da Refinaria Presidente Getúlio Vargas para coprocessar óleo de soja refinado e diesel na unidade de hidrotreatamento, possibilitando a produção de Diesel com 5% de teor renovável (Diesel R5). A capacidade atual é de 32 milhões de barris por dia de Diesel R5. Em 2022, a empresa também realizou o teste de Diesel R5 em uma frota de ônibus em Curitiba. Os resultados dos testes confirmaram a característica *drop-in* do combustível, ou seja, é um produto que pode ser utilizado em sistemas projetados para óleo diesel sem a necessidade de nenhuma modificação nos motores e infraestrutura logística. Assim, foi possível a primeira operação de venda de Diesel R5 (PETROBRAS, 2023).

Os compromissos de sustentabilidade da Petrobras focados na mitigação das mudanças climáticas cobrem 100% das emissões sob o controle operacional da empresa, trazendo metas para o horizonte de 2025 e 2030. A Petrobras possui a ambição de neutralizar as emissões líquidas operacionais de GEE até 2050. A previsão de investimentos da Petrobras em baixo carbono aumentou no plano estratégico 2023-2027, destinando US\$ 4,4 bilhões para a descarbonização das operações, produção e fornecimento de bioprodutos (diesel renovável e querosene de aviação sustentável) e pesquisa e desenvolvimento de baixo carbono (PETROBRAS, 2023).

Ainda de acordo com a Petrobras (2023), desde 2011, a empresa assumiu metas voluntárias para reduzir a intensidade das emissões de GEE e melhorar o aproveitamento de energia nos processos da empresa. Em 2019, as metas da Petrobras voltadas para a descarbonização passaram a ter como ano-base 2015, ano da criação do Acordo de Paris. A cada ciclo do plano estratégico, os compromissos da Petrobras são reavaliados. Dos seis compromissos públicos da empresa relacionados ao tema carbono, três foram atualizados no plano estratégico 2023-2027.

O primeiro dos compromissos revisados se refere à redução das emissões absolutas em 30% até 2030 (atualizado de 25% para 30%, ambos no ano-base 2015) e demonstra os esforços da Petrobras para avançar na descarbonização de suas operações. As emissões absolutas totais em 2015 foram de 78,2 milhões de tCO₂e e o compromisso da Petrobras é não exceder 54,8 milhões de toneladas de CO₂e em 2030. O segundo compromisso atualizado se direciona à reinjeção de 80 milhões de tCO₂ até 2025 em projetos de Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono ou *Carbon Capture, Utilization and Storage* (CCUS). O compromisso anterior da Petrobras apontava para a reinjeção de 40 milhões de tCO₂ até 2025 em projetos CCUS (PETROBRAS, 2023).

Ainda segundo a Petrobras (2023), o terceiro dos compromissos revisados consiste na consolidação da redução de 55% da intensidade de emissões de metano no *upstream* até 2025 (atualizado de 40% para 55%, ambos no ano-base 2015), atingindo em 2025 o valor de 0,29 tCH₄/mil tHC (toneladas de emissão de metano por mil toneladas de hidrocarbonetos produzido). A intensidade de emissões de metano no *upstream* foi de 0,65 tCH₄/mil tHC em 2015. O *upstream* concentra as atividades de exploração e produção de óleo e gás.

Na Figura 4, é possível ver os seis compromissos públicos da Petrobras relacionados à temática de carbono.

Figura 4 – Compromissos de Clima Petrobras



Fonte: Petrobras (2023)

A Petrobras está em constante busca por oportunidades em novos negócios, como o biorrefino, que aproveita as competências da empresa em tecnologias e operações de refino. Adicionalmente, a Petrobras identificou o desenvolvimento de uma oportunidade de inserir correntes de petróleo do Pré-sal, produzidas com menor intensidade de GEE, em mercados que valorizam produtos com essa característica. Além dos esforços para oferecer produtos com menor intensidade carbônica, o plano estratégico 2023-2027 traz como evolução os negócios que foram apontados por uma análise multicritério, dentre vários estudados, como os mais adequados para estudos posteriores pela empresa: eólica *offshore*, hidrogênio e captura de carbono. Contudo, a Petrobras ainda não possui investimento alocado no plano estratégico para esses possíveis novos negócios (PETROBRAS, 2023).

Ainda de acordo com a Petrobras (2023), a Política de Responsabilidade Social da empresa possui como diretriz investir em programas e projetos socioambientais, contribuindo com as comunidades onde a empresa atua e, de forma mais ampla, com a sociedade. O investimento socioambiental voluntário da Petrobras atende ao plano estratégico 2023-2027 como ferramenta de apoio à sustentabilidade do negócio. Um exemplo é o Projeto Mangues da Amazônia, apoiado pela Petrobras desde 2021, que visa recuperar áreas de-

gradadas de manguezais na maior área contínua de manguezais do planeta, localizada na costa amazônica. O projeto já reflorestou 14 hectares com 204 mil sementes e mudas, desenvolveu atividades socioeducativas com 514 crianças e jovens e capacitou 178 pessoas, ajudando na participação comunitária junto à conservação da biodiversidade.

À medida que o mundo continua a enfrentar o desafio de garantir um abastecimento de energia adequado e, ao mesmo tempo, garantir que a transição energética prossiga a um ritmo acelerado, surgem pontos de vista divergentes. Há quem acredite que os esforços da sociedade devem ser dirigidos exclusivamente para a transição energética, sem considerar as consequências muito reais de não garantir a segurança energética. Assim como a Petrobras, a ExxonMobil, empresa americana considerada uma das maiores do setor de petróleo e gás, acredita que existem dois desafios de grande importância, ambos necessitando da total cooperação e esforço de empresas, governos e ONGs (Organizações Não Governamentais) em todo o mundo, a fim de abordar estas questões críticas (EXXONMOBIL, 2023).

Ainda segundo a ExxonMobil (2023), a empresa também projeta sua resiliência durante a transição energética face a uma série de cenários futuros que estão alinhados com os objetivos do Acordo de Paris, incluindo as Emissões Líquidas Zero ou *Net Zero Emissions* (NZE) até 2050 da Agência Internacional de Energia (AIE). Estes testes de resiliência demonstram que o negócio da empresa está posicionado para o crescimento, mesmo num caminho agressivo de descarbonização, impulsionado pelo potencial de crescimento dos produtos químicos, dos combustíveis com emissões mais baixas, da captura e armazenamento de carbono e das oportunidades de hidrogênio, que são fundamentais para atingir as emissões líquidas zero.

A mais recente projeção da ExxonMobil sobre a oferta e a procura de energia até 2050, utilizando modelos baseados nas tendências atuais de desenvolvimento econômico, tecnologia, políticas globais, geopolítica e comportamento do consumidor, prevê que todas as fontes de energia continuem a ser importantes até 2050, sendo o petróleo e o gás natural responsáveis por 55% do mix energético mundial em 2050. De 2022 até 2027, a ExxonMobil planeja investir aproximadamente 17 bilhões de dólares em iniciativas para reduzir as emissões de gases com efeito de estufa. Estes investimentos destinam-se a possibilitar a redução das emissões nas operações e também são direcionados para a redução das emissões de terceiros através da comercialização e expansão da captura e armazenamento de carbono, hidrogênio e biocombustíveis (EXXONMOBIL, 2023).

Ao analisar as metas da ExxonMobil e Petrobras, pode-se observar que os compromissos da empresa americana visam o ano de 2030 e consideram 2016 como ano-base. Por outro lado, a Petrobras possui metas para os anos de 2025 e 2030, com ano-base 2015. É possível concluir que a empresa brasileira se mostra mais ambiciosa no objetivo de zero queima de rotina em *flare* até 2030. Já a ExxonMobil se destaca com uma meta de redução de 70-80% na intensidade de metano em toda a empresa. Contudo, não foi iden-

tificado um plano de investimento em energias renováveis na ExxonMobil. A figura 5 traz um resumo comparativo entre a Petrobras e a ExxonMobil no que tange os compromissos climáticos.

Figura 5 – Petrobras x ExxonMobil

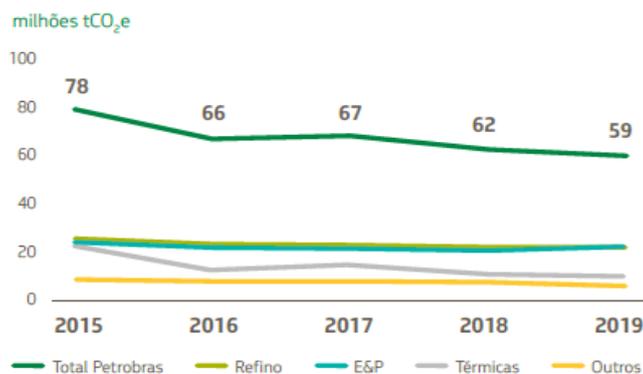


Fonte: Autoria Própria

Comparando os planos estratégicos 2020-2024 e 2023-2027 da Petrobras, pode-se perceber que, no primeiro plano, a empresa ainda não possuía a ambição de neutralizar as emissões líquidas operacionais de GEE até 2050. Adicionalmente, um dos compromissos estabelecidos no plano estratégico 2020-2024, o crescimento zero das emissões absolutas operacionais até 2025, foi atualizado para a redução das emissões absolutas operacionais totais em 30% até 2030, em comparação com 2015, no plano estratégico 2023-2027. De fato, as metas atualizadas demonstram o comprometimento da Petrobras em direção à descarbonização, visto que as emissões absolutas totais em 2015 foram de 78,2 milhões de tCO₂e e o compromisso da Petrobras é não exceder 54,8 milhões de toneladas de CO₂e em 2030.

Contudo, com base na figura 6, retirada do Caderno de Mudança do Clima de 2019 da empresa, é possível observar que houve queda nas emissões absolutas da Petrobras desde 2015, com a empresa emitindo 59 milhões de tCO₂e já no ano de 2019. Ao comparar com as 54,8 milhões de toneladas de CO₂e previstas para 2030, pouco avanço haveria nos 11 anos que as distanciam, o que demonstra um ponto do plano estratégico 2023-2027 da Petrobras a ser melhorado, a fim de que a empresa possua compromissos mais assertivos voltados à descarbonização.

Figura 6 – Emissões de GEE Petrobras



Fonte: Petrobras (2019)

Outro ponto pouco explorado pela companhia diz respeito à meta de redução na intensidade de carbono no segmento de E&P até 2025, atingindo 15 kgCO₂e/boe (quilogramas de dióxido de carbono equivalente por barril de óleo equivalente). Esse compromisso não apresentou evolução entre os planos estratégicos 2020-2024 e 2023-2027 da Petrobras. Aliás, no último plano, a empresa firmou o objetivo de manter os 15 kgCO₂e/boe até 2030.

A meta de redução de 55% na intensidade de emissões de metano no segmento *upstream*, atingindo em 2025 o valor de 0,29 tCH₄/mil tHC, em relação a 2015, se mostra ainda menos ambiciosa. Com base na figura 7, retirada do Caderno do Clima de 2023 da Petrobras, pode-se observar que, já no ano de 2022, a empresa alcançou o valor de 0,25 tCH₄/mil tHC. Ou seja, a meta da intensidade de emissões de metano no *upstream* para 2025 representa um valor maior do que o já registrado em 2022. Logo, pode-se concluir que a meta da Petrobras não se mostra ambiciosa e é passível de melhorias.

Figura 7 – Emissões de Metano Petrobras



Fonte: Petrobras (2023)

Ao analisar o plano estratégico 2023-2027 da Petrobras, algumas informações à respeito da evolução rumo à descarbonização não são apresentadas de forma clara. Os negócios de eólica *offshore*, hidrogênio e captura de carbono foram apontados para estudos posteriores pela empresa, ainda não possuindo investimento alocado no plano estratégico para esses possíveis novos negócios. Contudo, a Petrobras possui o compromisso direcionado à reinjeção de 80 milhões de tCO₂ até 2025 em projetos de CCUS, o qual engloba, justamente, a captura de carbono. No que tange à estratégia voltada à redução de emissões, não foi identificada uma meta a fim de reduzir as emissões de GEE do escopo 3 no plano estratégico 2023-2027 da Petrobras. Vale ressaltar que a maior parte das emissões da Petrobras, assim como de outras petrolíferas ao redor do mundo, ocorre nesse escopo.

Segundo a CNN (2022), outra crítica ao plano de descarbonização da Petrobras foi o valor de pouco mais de US\$ 4 bilhões voltado para energias limpas, renováveis e sustentáveis. Há um receio por parte dos dirigentes de que as questões ambientais tenham um papel secundário, com uma pequena parcela de investimento em comparação à quantidade de recursos que a empresa gera. Adicionalmente, embora o Brasil já tenha uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo e a Petrobras tenha estipulado um aumento gradual nos investimentos em energias renováveis, a entrada na cadeia produtiva do hidrogênio verde poderia acelerar o processo de transição energética e fortalecer ainda mais a posição da sociedade brasileira em fóruns internacionais sobre meio ambiente e descarbonização da economia global (INEEP, 2024).

De acordo com a Le Monde Diplomatique (2023), a Petrobras tem demonstrado uma saída do segmento de energia eólica ao vender sua participação em quatro usinas no Rio Grande do Norte. Além disso, a empresa colocou à venda a própria subsidiária, a PBio

(Petrobras Biocombustível), uma das maiores produtoras de biodiesel do país. Logo, com o potencial do Brasil para geração de energias renováveis, a continuidade de uma posição conservadora da Petrobras pode ser prejudicial para a competitividade de longo prazo da empresa.

4.2 Vale

De acordo com Murta (2020), a mineradora Vale, fundada em 1942 como a estatal Companhia Vale do Rio Doce, é hoje uma empresa privada que está entre as maiores mineradoras globais, sendo a maior produtora mundial de minério de ferro. A líder mundial na produção e exportação de minério de ferro é também uma das duas acionistas da mineradora Samarco, controlada pela Vale e pela BHP, empresa anglo-australiana líder mundial na extração e processamento de recursos minerais, e que está entre os principais produtores mundiais de *commodities*, incluindo minério de ferro. Logo, pode-se afirmar que a Vale é a maior empresa brasileira do setor de Mineração.

Segundo a Vale (2021a), a siderurgia é sua principal cliente. Intensivos em carbono, os setores de mineração e siderurgia representam cerca de 15% das emissões mundiais. Na Vale, as emissões de escopo 3, aquelas relacionadas à sua cadeia de valor (fornecedores de aço e clientes), representam 98% do total de emissões da empresa. A Vale também vem tomando ações para ajudar a descarbonizar a siderurgia, com a introdução de soluções na produção de aço, que incluem minério de ferro de alta qualidade, briquetes verdes metálicos, rotas alternativas de produção e outras iniciativas.

É importante salientar que o primeiro relatório sobre mudança do clima da Vale alinhado às recomendações da *Task Force on Climate-Related Financial Disclosures* (TCFD ou Força-Tarefa sobre Divulgações Financeiras Relacionadas ao Clima) foi o Relatório sobre Mudanças Climáticas da empresa, publicado em 2021 (VALE, 2021b). O documento apresenta a resiliência da estratégia empresarial da Vale diante dos cenários de mudanças climáticas e reúne a estratégia da empresa para atingir emissões zero. De acordo com a Vale (2021b), o documento será publicado anualmente.

Com base nos cenários da Agência Internacional de Energia, apenas 4% dos ativos da Vale têm elevada exposição a riscos de transição (como mudanças regulatórias, alterações na procura ou substituição de produtos devido a novas tecnologias). Atuando nessa frente, a Vale adotou metas de redução de emissões e um preço interno de carbono, além de estar ajustando seu portfólio de projetos para fornecer soluções de baixo carbono, adaptando-se também às potenciais demandas do mercado (VALE, 2021b).

Ainda segundo a Vale (2021b), foi identificado um potencial de utilização de fontes de energia com menores emissões em mais de 68% dos ativos da empresa. Em busca da liderança na mineração de baixo carbono, a Vale está comprometida em alcançar 100% de autoprodução de energia elétrica a partir de fontes renováveis no Brasil até 2025, e 100% de consumo de eletricidade renovável globalmente até 2030. A empresa também criou um

programa interno chamado *PowerShift* para apoiar metas de descarbonização com foco na transição para uma matriz energética de baixo carbono.

O bom posicionamento da Vale para um mercado que valoriza produtos de alta qualidade e baixas emissões de CO₂ faz com que a empresa se beneficie com a tendência de descarbonização ao desenvolver pelotas de minério de ferro com CO₂ próximo a zero para altos-fornos em ritmo acelerado; utilizar tecnologia proprietária para oferecer mais produtos *premium* (> 68% Fe) necessários para a rota de produção EAF (alternativa sustentável para a fabricação de aço); e estabelecer, juntamente com parceiros, de uma empresa de serviços *asset-light* (que mantém a menor quantidade possível de ativos) com direitos de uso de tecnologias de ponta para ajudar a acelerar a transição de altos-fornos para rotas de produção com menos CO₂. A estratégia da Vale já prevê um portfólio de produtos de alta qualidade, representando 90% de sua produção até 2024 (VALE, 2021a).

De acordo com a Vale (2021a), o primeiro pilar de ação climática da empresa está relacionado à redução das emissões operacionais, que são representadas pelos escopos 1 e 2. O escopo 1 consiste nas emissões geradas pelos processos de pelletização e metalurgia, e mineração e ferrovias; o escopo 2 nas emissões do consumo de energia elétrica; e o escopo 3 engloba as emissões associadas à cadeia de valor: processamento de produtos vendidos, navegação e utilização de carvão. A meta da empresa é reduzir as emissões dos escopos 1 e 2 em 33% até 2030, em linha com o objetivo do Acordo de Paris de limitar o aumento da temperatura a 1,5°C. As emissões absolutas de escopo 1 e 2 foram de 12,2 MtCO₂e em 2017 (ano-base), sendo o valor de 8,2 MtCO₂e a meta da empresa para 2030.

Em 2021, a Vale anunciou investimentos de US\$ 4 a 6 bilhões até 2030 para cumprir seu compromisso de reduzir as emissões de escopo 1 e 2 (emissões operacionais). O plano de transição climática da Vale define as rotas principais de solução: a curto prazo, será dada prioridade à eficiência energética e à transição para as energias renováveis, e a Vale também aumentará a participação da bioenergia como combustível de transição para as operações da empresa; no longo prazo, a Vale aposta na eletrificação e em tecnologias inovadoras (VALE, 2021a).

Ainda segundo a Vale (2021a), a identificação e análise dos riscos das mudanças climáticas fazem parte do processo de gestão de riscos corporativos da empresa. No Porto Ponta da Madeira, a implantação do piloto de análise de curto prazo por meio do aplicativo *Vale Climate Forecast* realiza previsões diárias de precipitação, possibilitando a divulgação dos dados a todos os operadores portuários. Com as previsões, os operadores otimizam os planos de embarque de produtos e minimizam o risco de não embarque devido à umidade. A Vale considera uma perda operacional média de 0,5% na produção em função de condições anormais de precipitação no Porto Ponta da Madeira. Além disso, danos ao complexo logístico da Vale no Norte do Brasil podem afetar toda a operação, uma vez que todo o produto da mina de Carajás é transportado por ferrovia até o porto.

Na Figura 8, é possível observar um resumo dos resultados da análise de longo prazo

dos riscos físicos associados às mudanças climáticas.

Figura 8 – Riscos Físicos da Vale



Fonte: Vale (2021a)

No final de 2020, a Vale tornou-se a primeira mineradora a definir uma meta quantitativa para emissões de escopo 3 (cadeia de valor). A empresa se comprometeu a reduzir as emissões líquidas nesse escopo em 15% até 2035, a partir do desenvolvimento de novos produtos, soluções baseadas na natureza, parcerias e engajamento com clientes e fornecedores. De 553,1 MtCO₂e em 2018, as emissões serão reduzidas para 470,1 MtCO₂e em 2035. A meta do escopo 3 será revisada em 2025 e a cada cinco anos, dadas as incertezas sobre tecnologias de baixo carbono e políticas climáticas. Dentre as emissões, 94% estão concentradas no processamento dos produtos vendidos, principalmente na produção de aço. As emissões do escopo 3 associadas ao envio de produtos representam 3% e o uso de carvão na geração de energia representa apenas 2% das emissões (VALE, 2021a).

De acordo com a BHP (2023), espera-se que a população mundial aumente para quase 10 bilhões de pessoas até 2050, enquanto a população urbana deve crescer 50%, para quase 7 bilhões. Como consequência, mais pessoas e mais urbanização significam uma maior necessidade de produtos. Assim como a Vale, a BHP espera que a procura por seus produtos seja intensificada pelo impulso crescente em todo o mundo para a descarbonização. Produtos como o cobre e o níquel, utilizados em veículos elétricos, além do aumento da procura de aço bruto para turbinas eólicas, demonstram que o mundo precisa de mais

mineração para satisfazer esta procura. Logo, as empresas precisam aumentar a produção ao mesmo tempo que trabalham para descarbonizar suas operações.

No ano fiscal de 2022, as emissões operacionais de GEE da BHP foram de 11 milhões de toneladas de CO₂ equivalente, apresentando uma redução de 3,5 MtCO₂e em relação ao registrado no ano fiscal de 2020, alcançada principalmente através da introdução de eletricidade renovável em muitos dos ativos operados, principalmente no Chile. Atualmente, o perfil de emissões da empresa está voltado para o diesel. Além disso, espera-se que a atividade empresarial da BHP cresça até o ano fiscal de 2030, o que nas atuais circunstâncias levaria a algum crescimento nas emissões. Para contrariar este crescimento, a BHP planeja a implantação adicional de energias renováveis antes do ano fiscal de 2030 e esforços adicionais para proporcionar uma redução em outras fontes de emissões – incluindo o diesel, o metano e o gás natural (BHP, 2023).

Ainda segundo a BHP (2023), a empresa projetou uma das minas de potássio mais sustentáveis do mundo, no Canadá. Espera-se que a mina tenha emissões de carbono cerca de 50% inferiores por tonelada de produto produzido, em comparação com operações semelhantes na região. Cerca de 60% das emissões operacionais da mina provirão de eletricidade da concessionária do governo local. A segunda maior fonte de emissões da mina, com quase 40%, está associada à utilização de gás natural na unidade de processamento. Para este projeto, a BHP pretende explorar uma série de tecnologias potenciais para mitigar as emissões de GEE ou reduzir a dependência do gás natural, incluindo CCS, hidrogênio e até oportunidades de tecnologia nuclear. O diesel representará apenas uma proporção muito pequena das emissões operacionais da mina.

Ao analisar as metas da BHP e Vale, pode-se observar que os compromissos da empresa anglo-australiana visam o ano fiscal de 2030 e consideram o ano fiscal de 2020 como base. Por outro lado, a Vale possui metas para os anos de 2030 e 2035, com anos-base 2017 e 2018, respectivamente. É possível concluir que os compromissos da BHP são similares aos da Vale, com a empresa brasileira se mostrando mais ambiciosa no objetivo de reduzir as emissões líquidas no escopo 3 em 15% até 2035. Já a BHP se destaca com uma meta de redução das emissões operacionais em pelo menos 30% até o ano fiscal de 2030. A figura 9 traz um resumo comparativo entre a Vale e a BHP no que tange os compromissos climáticos.

Figura 9 – Vale x BHP

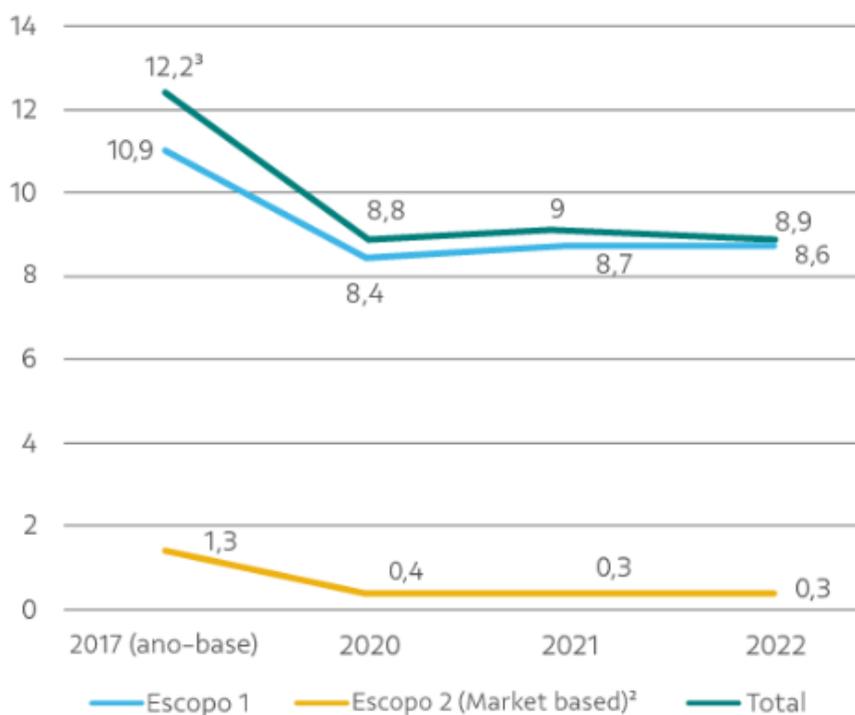


Fonte: Autoria Própria

Em 2020, um ano antes da publicação do Relatório sobre Mudanças Climáticas da Vale, a empresa anunciou a meta de zerar suas emissões líquidas de GEE até 2050, nos escopos 1 e 2. Na COP 27, em 2022, a Vale apresentou as medidas adotadas para atingir essa meta, como o *PowerShift*. Criado em 2018, o programa tem como objetivo a substituição de combustíveis fósseis por fontes limpas em suas operações, com foco no uso de energias renováveis e combustíveis alternativos. A estratégia de eletrificação de ativos, por exemplo, já inclui a adoção de duas locomotivas de pátio movidas a bateria nos portos da empresa em Vitória e São Luís, dois caminhões elétricos de 72 toneladas em operações de minas na Indonésia e em Minas Gerais, e cerca de 50 equipamentos elétricos em minas subterrâneas no Canadá (VALE, 2022).

Com base na figura 10, é possível observar que houve queda nas emissões operacionais (escopos 1 e 2) da Vale desde 2017, com a empresa emitindo 8,9 milhões de tCO₂e já no ano de 2022. Contudo, essa redução deve-se majoritariamente à diminuição nos volumes de produção em relação a 2017, e não às estratégias de redução de emissões em si. Ao comparar com as 8,2 milhões de toneladas de CO₂e previstas para 2030, pouco avanço haveria nos 8 anos que as distanciam. Logo, pode-se concluir que a meta da Vale pode ser atualizada a fim de que se torne mais ambiciosa.

Figura 10 – Emissões Operacionais da Vale



Fonte: Vale (2024)

Apesar de a Vale ser a primeira mineradora do mundo a definir uma meta quantitativa para as emissões de GEE do escopo 3, a meta de redução de 15% nas emissões líquidas nesse escopo até 2035 também é passível de melhorias. As emissões de escopo 3, em 2022, atingiram um total de 477,8 milhões de toneladas de CO₂e, representando uma redução aproximada de 14% em relação ao ano-base de 2018, variação decorrente principalmente da diminuição no volume de vendas de produtos. Ou seja, no ano de 2022 a Vale praticamente já alcançou a meta prevista para 2035. A empresa justifica que é esperado um aumento na produção no curto prazo, o que pode levar a um aumento nas emissões. Contudo, sabe-se que as mineradoras precisam trabalhar para descarbonizar suas atividades simultaneamente ao aumento na produção.

Analisando o Relatório sobre Mudanças Climáticas da Vale (VALE, 2021a), é possível observar outras lacunas no que diz respeito à evolução rumo à descarbonização. A empresa divulgou o compromisso de reduzir em pelo menos 40% a intensidade média de CO₂ no transporte marítimo internacional até 2030, progredindo para 70% até 2050 (em relação a 2008). Entretanto, não foi identificada uma meta de redução na intensidade de emissões de GEE nas operações da Vale, relacionada à quantidade de minério produzido. Além disso, foi divulgado pela Vale somente o Relatório sobre Mudanças Climáticas de 2021, não havendo publicações anuais como informado pela empresa.

De fato, a Vale implementa uma série de medidas de redução em todos os escopos de emissões, algumas das quais são inovadoras e podem levar a reduções substanciais de emissões, se implementadas em escala. No entanto, segundo o Monitor de Responsabilidade Climática Corporativa, publicado pelas organizações climáticas New Climate Institute e Carbon Market Watch (2022), falta uma visão abrangente da estratégia de redução de emissões da Vale, e o provável impacto de redução das medidas propostas permanece obscuro. É necessária uma visão mais abrangente da escala em que as medidas são implementadas para compreender o seu provável potencial de redução. Também ainda não está claro como a Vale planeja reduzir as emissões de metano e as emissões decorrentes de mudanças no uso da terra.

De acordo com o Monitor de Responsabilidade Climática Corporativa, a Vale parece buscar opções de energia renovável de maior qualidade, mas são necessárias mais informações para uma avaliação abrangente. A Vale assinou PPAs (*Power Purchase Agreements* ou Contratos de Compra de Energia) com projetos eólicos e hidrelétricos, e possui ativos de eletricidade renovável. Não está claro se a Vale retém quaisquer certificados de energia renovável dos seus próprios ativos. A eletricidade que a Vale consome é gerada por uma combinação de instalações eólicas, solares e hidrelétricas, mas a empresa não fornece uma visão geral da importância relativa de cada uma dessas fontes. Embora as energias solar e eólica sejam realmente de baixo carbono, as instalações hidrelétricas no Brasil podem gerar emissões substanciais de metano.

Ainda segundo a New Climate Institute e a Carbon Market Watch (2022), embora a estratégia de energia renovável da Vale seja razoavelmente abrangente, não é possível identificar medidas significativas para abordar as principais fontes de emissão da empresa, relacionadas ao escopo 3, e sua meta poderia ser enganosa. O compromisso de neutralidade de carbono da Vale para 2050 cobre as emissões de escopo 1 e 2, que contribuem com apenas 2% de sua pegada climática e depende do uso de créditos de compensação de carbono. As emissões de escopo 3 – principalmente processamento, transporte e uso de produtos vendidos – respondem por 98% da pegada de GEE da Vale. Logo, a Vale poderia considerar a comunicação de metas mais abrangentes e diferenciadas que retratassem de forma transparente as perspectivas realistas para o seu setor intensivo em emissões.

4.3 Gerdau

De acordo com o Instituto Aço Brasil (2022), a Gerdau é a maior siderúrgica brasileira e uma das principais fornecedoras de aços longos das Américas e de aços especiais do mundo. No Brasil, também produz aços planos, além de minério de ferro para consumo próprio. A empresa está presente em 10 países e conta com mais de 30 mil colaboradores diretos e indiretos em todas as suas operações. As ações da Gerdau estão listadas nas bolsas de valores de São Paulo (B3), Nova York (NYSE) e Madri (Latibex). Além disso, em 2023, a Gerdau foi eleita pelo Merco como a empresa industrial com melhor reputação

no Brasil na categoria Mineração, Siderurgia e Metalurgia. A empresa segue no topo da categoria, ocupando o 24º lugar entre as 100 empresas mais admiradas do país (MERCOSUL, 2024).

Segundo a Gerdau (2022a), o aço está presente em novas tecnologias de produção de energia, como insumo para painéis solares e torres eólicas, e em novas soluções de infraestrutura, sendo um material crucial para o processo de descarbonização do planeta. Dessa forma, a Gerdau assumiu a meta de reduzir suas emissões de GEE em 11% até 2031, passando para um volume de emissões de 0,83 t de CO₂e por tonelada de aço, inferior à metade da média mundial do setor siderúrgico. Para analisar as informações contidas no plano de descarbonização da Gerdau, os dados contidos neste tópico foram majoritariamente retirados do relatório de Compromisso da Gerdau com as Mudanças Climáticas, publicado em 2022.

É importante salientar que a divulgação das metas para reduzir as emissões de carbono da Gerdau no médio e longo prazo foi realizada primeiramente em fevereiro de 2022, e publicada no Relatório Anual de 2021 da empresa. Nos relatórios anteriores, a Gerdau havia começado a informar sobre suas emissões de carbono e outros indicadores ESG (*Environmental, Social and Governance* ou Ambientais, Sociais e de Governança). Originalmente, a construção dessas metas começou em 2020 e envolveu a utilização de uma metodologia que, de acordo com a Gerdau (2022b), explica a forma mais custo-efetiva de alcançar as reduções pretendidas.

A Gerdau declara participar ativamente em colaboração com entidades setoriais, universidades e centros de pesquisa na procura de tecnologias disruptivas. Por meio do Gerdau Next, o braço de novos negócios da empresa, a Gerdau estuda possibilidades além do aço e busca soluções com alto valor agregado. Além disso, existe um grupo de trabalho com especialistas de diversas áreas, que se reúnem periodicamente para direcionar possíveis tecnologias alinhadas à estratégia de descarbonização da companhia. Oportunidades como CCUS e hidrogênio fazem parte das análises do grupo (GERDAU, 2022b).

Ainda segundo a Gerdau (2022b), não existe uma solução única para a descarbonização do aço e as soluções inovadoras atuais ainda não são escaláveis, ou seja, não podem ser replicadas em várias proporções com a mesma taxa de sucesso, sem aumentar significativamente os custos. A AIE prevê que a implantação generalizada de tecnologias inovadoras irá acelerar entre 2030 e 2050, mas a sua implementação dependerá da disponibilidade de recursos e políticas locais. Um dos pilares da estratégia de descarbonização da Gerdau é o investimento em novas tecnologias e inovação aberta. A empresa interage com *startups* e promete estar atenta a soluções com novas tecnologias para uma produção de aço cada vez mais sustentável.

A Gerdau possui uma das menores médias de emissão de GEE da siderurgia mundial. As emissões de GEE da empresa de 0,93 t de CO₂e por tonelada de aço representam aproximadamente metade da média global da indústria siderúrgica de 1,89 t de CO₂e por

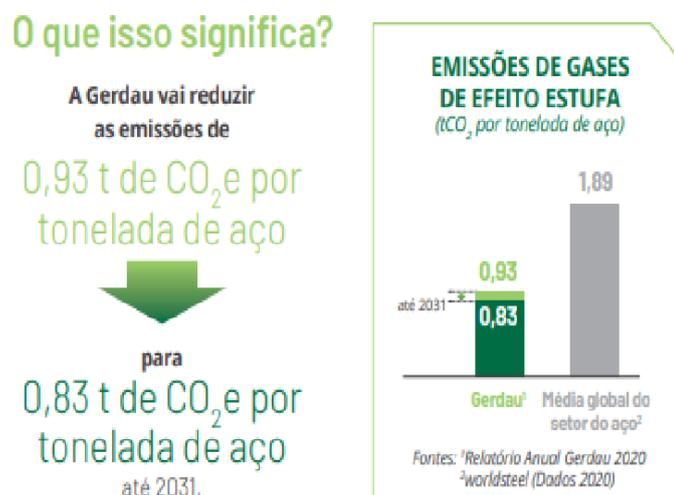
tonelada de aço (WORLDSTEEL, 2023). Entre os fatores que levaram a Gerdau a atingir essas médias mais baixas está o modelo de produção da empresa, já que 73% do aço produzido é proveniente da reciclagem de sucata. A utilização de sucata ferrosa permite menor emissão de GEE na produção de aço, além de economizar recursos naturais, como água e matéria-prima, reduzindo também o consumo de energia. Para cada tonelada de sucata reciclada, evita-se a emissão de 1,5 tonelada de CO₂e. A Gerdau é a maior recicladora da América Latina: 11 milhões de toneladas de sucata são transformadas em aço anualmente (GERDAU, 2022a).

Ainda de acordo com a Gerdau (2022a), a substituição de fontes de energia fósseis por renováveis é um dos caminhos para a descarbonização do setor siderúrgico, pois implica a redução das emissões de GEE. As florestas plantadas da Gerdau são matéria-prima de fonte renovável para o carvão vegetal, as quais retiram e armazenam carbono durante seu ciclo de crescimento. O carvão vegetal funciona como biorredutor na fabricação do ferro-gusa, o qual produz aço com menor intensidade de GEE. A Gerdau é a maior produtora de carvão vegetal do mundo e para isso possui mais de 250.000 hectares de base florestal em Minas Gerais. Desse total, cerca de 91 mil hectares são de mata nativa preservada, uma área maior que a cidade de São Paulo. Aproximadamente 80% da produção da Gerdau já é baseada no uso de fontes recicladas (sucata) ou renováveis (carvão vegetal).

A Gerdau estruturou uma estratégia de médio e longo prazo a fim de fazer parte das soluções para uma economia com baixa emissão de GEE, planejando estar, em 2031, em uma posição ainda mais seleta entre as siderúrgicas mais eficientes em redução de emissões no mundo. Até lá, a indústria siderúrgica global ainda precisaria reduzir suas emissões de GEE em 50% para atingir o novo volume de emissões da Gerdau. Para tal, a empresa investiu, em 2022, R\$ 639,31 milhões em projetos ambientais e práticas de ecoeficiência (GERDAU, 2022a).

A Figura 11 apresenta a meta da empresa estabelecida para 2031.

Figura 11 – Compromisso para 2031 Gerdau



Fonte: Gerdau (2022a)

Segundo a Gerdau (2022a), a empresa pretende atingir esse compromisso por meio da maior eficiência energética e operacional, da ampliação do uso de sucata na matriz produtiva, da expansão da base florestal, de investimentos no negócio de energias renováveis, e de investimentos em novas tecnologias e inovação aberta. Como maior produtora de aço brasileira e uma das principais produtoras globais, a Gerdau também possui a ambição de ser carbono neutro em 2050. Embora ainda não existam tecnologias maduras e políticas públicas que permitam hoje à siderurgia neutralizar suas emissões de GEE, a Gerdau objetiva buscar soluções para a redução de emissões de GEE em linha com os compromissos globais.

A empresa também possui auditoria externa e independente dos dados do inventário de GEE. O escopo 1 consiste nas emissões diretas de GEE; o escopo 2 nas emissões indiretas de GEE de energia; e o escopo 3 engloba outras emissões indiretas de GEE para unidades no Brasil, EUA e Canadá. Pontos de melhoria no processo de gestão do tema nas unidades operacionais foram levantados, sendo abordados em planos de ação com acompanhamento mensal. A meta da Gerdau para redução da emissão de GEE até 2031 se refere aos escopos 1 e 2 (GERDAU, 2022a).

Assim como a Gerdau, a ArcelorMittal, empresa luxemburguesa considerada a maior produtora de aço do mundo, prevê que nos próximos anos a energia utilizada para produzir aço passará por uma transição cada vez mais radical, passando de energia baseada em combustíveis fósseis para energia de baixo carbono, como a energia eólica, a biomassa e o hidrogênio verde. De acordo com a ArcelorMittal (2023), novas abordagens, como a tecnologia CCUS, também serão utilizadas.

A ArcelorMittal iniciou, em 2022, a utilização de gás natural na unidade de Tubarão,

no Espírito Santo, reduzindo as emissões de dióxido de carbono em comparação com outros combustíveis fósseis, como o carvão e o petróleo. Para atingir o objetivo de se consolidar como uma indústria neutra em carbono, a ArcelorMittal desenvolveu cinco estratégias voltadas à redução de CO₂: aumento do uso de sucata, busca por fontes de energia renováveis, transformação da produção de aço, transformação do uso de energia e compensação de emissões remanescentes (ARCELORMITTAL, 2023).

Ainda segundo a ArcelorMittal (2023), a empresa líder no setor siderúrgico é também referência em práticas sustentáveis. O seu reconhecimento global se deve ao desenvolvimento de produtos com menor pegada de carbono, utilizando tecnologias em toda a cadeia produtiva para minimizar o impacto ambiental e promover uma economia circular com baixas emissões de carbono. A ArcelorMittal já se comprometeu a investir R\$ 1,9 bilhão globalmente para desenvolver tecnologias neutras em carbono. No Brasil, estão previstas iniciativas para aumentar o uso de sucata como matéria-prima, aumentar a utilização de gás natural e otimizar o uso de carvão vegetal nas usinas, além de projetos de eficiência.

Ao analisar as metas da ArcelorMittal e Gerdau, pode-se observar que os compromissos da empresa luxemburguesa visam o ano de 2030 e consideram 2018 como ano-base. Por outro lado, a meta da Gerdau visa o ano de 2031, com ano-base 2020. É possível concluir que os compromissos da ArcelorMittal estão em linha com os da Gerdau, com a empresa brasileira se mostrando mais ambiciosa no objetivo de reduzir suas emissões de GEE para 0,83 t de CO₂e por tonelada de aço até 2031. Já a ArcelorMittal se destaca com a meta de utilizar 100% de energia elétrica renovável certificada até 2030 no Brasil. A figura 12 traz um resumo comparativo entre a Gerdau e a ArcelorMittal no que tange os compromissos climáticos.

Figura 12 – Gerdau x ArcelorMittal



Fonte: Autoria Própria

Para alcançar a neutralidade carbônica são necessárias tecnologias disruptivas na produção de aço, que ainda não são econômica e operacionalmente viáveis à escala industrial. Para contribuir para este cenário, a Gerdau colabora com parceiros e entidades do se-

tor na procura de soluções de baixo carbono. Como parte desta jornada, também serão necessárias políticas públicas e medidas que visem a redução das emissões de GEE nos processos industriais. A fim de que a Gerdau atinja a meta de 2031, estão previstos investimentos na ordem de um bilhão de dólares voltados à eficiência energética e operacional, incluindo iniciativas de melhoria e verticalização de matérias-primas, centralizando a cadeia de produção (GERDAU, 2022b).

Com base na figura 13, retirada do Relatório Anual 2022 da empresa (GERDAU, 2022b), é possível observar que houve queda na intensidade de emissões de GEE (escopos 1 e 2) da Gerdau desde 2020, com a empresa emitindo 0,86 tCO₂e/t de aço já no ano de 2022. Isso se deve à melhoria da eficiência nas operações da empresa e à alguns projetos de redução de emissões de GEE que entraram em operação. Ao comparar com as 0,83 tCO₂e/t de aço previstas para 2031, pouco avanço haveria nos 9 anos que as distanciam, o que demonstra um ponto do compromisso da Gerdau a ser melhorado, a fim de que a empresa possua metas mais assertivas voltadas à descarbonização. Vale ressaltar que, incluindo as *Joint Ventures* da Gerdau, a meta da empresa é ajustada para 0,82 tCO₂e/t de aço produzido.

Figura 13 – Emissões de GEE Gerdau

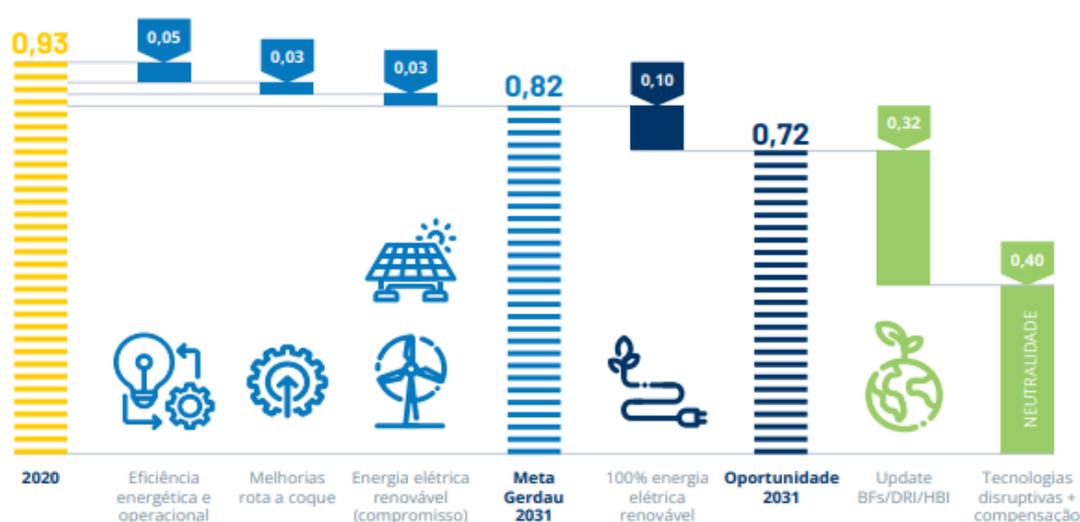


Fonte: (GERDAU, 2022b)

Apesar de a Gerdau possuir uma das menores intensidades de emissões de GEE da indústria do aço, existe uma oportunidade de melhoria para a meta de 2031, como o

demonstrado pela empresa na figura 14. A utilização de 100% de energia elétrica renovável seria crucial para que o compromisso da Gerdau atinja um valor menor do que o pretendido pela empresa. Contudo, de acordo com a Gerdau (2022b), a empresa possui 15% de energia renovável nos processos produtivos globais e, em termos de energia elétrica, é atingido um percentual de 43% de fontes renováveis e de baixa emissão de CO₂. Logo, pode-se observar que a Gerdau está um passo atrás de outras empresas dos segmentos de mineração e siderurgia que possuem como meta (ou já atingiram) 100% de consumo de energia elétrica renovável no Brasil.

Figura 14 – Oportunidade para 2031 Gerdau



Fonte: (GERDAU, 2022b)

Ao analisar o Compromisso da Gerdau com as Mudanças Climáticas (GERDAU, 2022a) e o Relatório Anual de 2022 da empresa (GERDAU, 2022b), é possível observar outras lacunas no que diz respeito à evolução rumo à descarbonização. As oportunidades como CCUS e hidrogênio foram apontadas somente como possíveis tecnologias alinhadas à estratégia de descarbonização da Gerdau, não sendo incorporadas atualmente pela empresa. A produção sustentável de aço é um dos maiores desafios que a indústria enfrenta, e o hidrogênio verde poderia substituir o carvão em processos integrados de redução do minério de ferro (ENGIE, 2023).

Ainda segundo a ENGIE (2023), no processo tradicional de fabricação do aço, o carbono gera CO₂ em contato com o oxigênio. Ao substituir o carbono pelo hidrogênio, este se junta ao oxigênio e transforma-se em H₂O (água). Para que isso seja possível em larga escala, o hidrogênio deve ser produzido a custos competitivos e é preciso que a indústria instale reatores que permitam a sua utilização. Paralelamente, o CCUS é estratégico como opção para mitigar os efeitos climáticos. Pode ser aplicado de diversas formas e em diversos setores, oferecendo o potencial de contribuir – direta ou indiretamente – para

a redução de emissões em quase todas as partes do sistema energético global. O CCUS envolve a remoção de CO₂ da atmosfera, de modo a equilibrar emissões inevitáveis ou tecnicamente difíceis de reduzir.

O CCUS também pode facilitar a produção de hidrogênio limpo a partir do gás natural ou do carvão, que são hoje as fontes de praticamente toda a produção de hidrogênio, e proporcionar uma oportunidade para levar hidrogênio com baixo ou nenhum carbono a novos mercados em um curto espaço de tempo, com custo mínimo (ENGIE, 2023). No que tange à estratégia voltada à redução de emissões na Gerdau, não foi identificada uma meta a fim de reduzir as emissões de GEE do escopo 3. Vale ressaltar que, apesar da maior parte das emissões da empresa ser proveniente dos escopos 1 e 2, as emissões da Gerdau relacionadas ao escopo 3 têm aumentado nos últimos anos.

4.4 Análise comparativa

Ao analisar as estratégias da Petrobras, Vale e Gerdau, é possível observar que cada empresa possui seu próprio caminho rumo à descarbonização. A Tabela 1 abaixo resume algumas informações cruciais das empresas brasileiras à respeito de ações voltadas à sustentabilidade e ao combate às mudanças climáticas.

Tabela 1 – Síntese Empresas Energo-Intensivas

EMPRESA	PETROBRAS	VALE	GERDAU
Possui Inventário de GEE?	Sim	Sim	Sim
Publica Relatórios sobre práticas ESG?	Sim	Sim	Sim
Meta Médio Prazo (escopos 1 e 2)	Reduzir emissões em 30% até 2030	Reduzir emissões em 33% até 2030	Reduzir intensidade de emissões em 11% até 2031
Meta Médio Prazo (escopo 3)	Não possui	Reduzir emissões em 15% até 2035	Não possui
Meta Longo Prazo (escopos 1 e 2)	<i>Net Zero</i> até 2050	<i>Net Zero</i> até 2050	<i>Net Zero</i> até 2050
Ano que anunciou <i>Net Zero</i>	2021	2020	2022
Meta Longo Prazo (escopo 3)	Não possui	Não possui	Não possui
Objetivo Intensidade de Emissões	15 kgCO ₂ e/boe até 2025 (E&P)	Não possui	830 kgCO ₂ e/t (aço) até 2031

Fonte: Autoria Própria

5 Conclusões e considerações finais

Conforme apresentado anteriormente, as empresas de setores intensivos em energia são atores importantes para alcançar os objetivos propostos no Acordo de Paris. Nesse sentido, muitos grandes investidores estão exigindo progressos específicos em direção à neutralidade carbônica como condição para investir em empresas. Logo, o futuro dos setores energo-intensivos passará inevitavelmente pelo desenvolvimento de fontes de energia renováveis e pela implementação de tecnologias verdes em todo o processo de produção.

Diante do exposto, é fundamental analisar os planos de descarbonização das empresas intensivas em energia à medida que são identificados os compromissos das corporações com a sustentabilidade e o combate às mudanças climáticas, permitindo avaliar a assertividade das empresas em relação aos seus objetivos. Sendo assim, com base nos planos de descarbonização das corporações, o presente trabalho investiga os compromissos climáticos de empresas de três setores energo-intensivos no Brasil: petrolífero, de mineração e siderúrgico. Por meio dos planos de descarbonização também é possível averiguar quais os prazos para que as metas traçadas sejam atingidas e que ações serão realizadas pelas empresas para reduzir suas emissões de GEE.

Através dos compromissos associados aos planos de descarbonização da Petrobras, Vale e Gerdau, pode-se realizar a avaliação do progresso das corporações em direção às metas demonstrando o quanto a empresa já caminhou rumo aos objetivos pretendidos. Com isso, foi possível analisar os compromissos das corporações e verificar que, muitas vezes, as metas das empresas não se mostram ambiciosas e são passíveis de melhorias, havendo pouco avanço em longos períodos de tempo.

A fim de que os compromissos das empresas sejam atingidos, certas tecnologias são cruciais para a descarbonização dos setores. É o caso da CCS, considerada uma das alternativas mais importantes para a descarbonização dos setores energético e industrial, fazendo parte da carteira de compromissos nacionais de muitos países signatários do Acordo de Paris. Outra alternativa citada pelas empresas, especialmente a Petrobras, é a tecnologia de CCUS. Ambas tecnologias realizam a captura de carbono, porém, enquanto o objetivo da CCS é armazenar o carbono em formações geológicas profundas, o CCUS pretende reaproveitar o material capturado. O hidrogênio também é citado como oportunidade pelas empresas estudadas. No entanto, sua utilização é vista somente como uma possível tecnologia futura.

Conforme citado neste trabalho, a estratégia de eletrificação é outra aposta de empresas energo-intensivas, em especial a Vale. A adoção de locomotivas movidas a bateria e caminhões elétricos são exemplos de ativos que deixaram de usar o óleo diesel, segunda fonte energética mais utilizada no setor de mineração. Na indústria siderúrgica, a produção de carvão vegetal é uma alternativa complementar à reciclagem de sucata. Aproximi-

madamente 80% da produção da Gerdau já é baseada na utilização de fontes recicladas (sucata) ou renováveis (carvão vegetal). Portanto, é preciso que as empresas intensivas em energia utilizem continuamente alternativas tecnológicas como estratégia para atingir suas metas climáticas.

No que diz respeito aos compromissos climáticos em si, foi observado, nas três empresas estudadas, que as emissões operacionais (escopos 1 e 2) de GEE estão bem encaminhadas em direção aos objetivos pretendidos, porém sem grandes ambições. Acontece que, nos primeiros anos após o ano-base das metas, há uma grande redução nas emissões operacionais. Contudo, esse ritmo de redução se torna cada vez mais lento, a ponto do compromisso estar próximo de ser alcançado bem antes do prazo final estabelecido. Além disso, as reduções nem sempre devem-se à melhoria da eficiência nas operações da empresa ou à projetos de redução de emissões de GEE. É o caso da Vale, onde a redução de emissões se deve majoritariamente à diminuição nos volumes de produção.

Também foi possível verificar compromissos que já foram completamente atingidos antes do prazo estabelecido. Isso acontece na meta de redução da intensidade de emissões de metano no segmento *upstream* da Petrobras. No ano de 2022, a empresa alcançou uma intensidade menor do que a pretendida para 2025. Apesar de a Petrobras conseguir atingir um valor de intensidade de emissões de metano inferior à meta, a empresa não atualizou o compromisso.

Adicionalmente, foram identificadas potenciais melhorias nas metas das empresas, por vezes sendo demonstradas pelas corporações somente como oportunidade, e não como compromisso. É o que acontece na Gerdau, onde a oportunidade para 2031 considera a utilização de 100% de energia elétrica renovável, compromisso o qual outras empresas dos segmentos de mineração e siderurgia vem aderindo. Contudo, a Gerdau não objetiva seguir esse caminho a fim de atingir sua meta para 2031, a qual possui um valor aproximadamente 14% maior em relação à oportunidade identificada.

Vale ressaltar que as metas das empresas brasileiras estão em linha com as de corporações internacionais do mesmo setor. É unanimidade entre as empresas estudadas o objetivo de atingir emissões líquidas zero de GEE nos escopos 1 e 2 até 2050. Em relação à estratégia climática, as empresas estrangeiras também possuem investimentos destinados a possibilitar a redução das emissões nas suas operações e nas de terceiros, através da comercialização e expansão da CCS, hidrogênio e biocombustíveis. Além disso, a implantação de energias renováveis é amplamente citada. Em geral, as empresas preveem que, nos próximos anos, a energia utilizada em setores energo-intensivos passará por uma transição cada vez mais radical, passando de energia baseada em combustíveis fósseis para energia de baixo carbono, como a energia eólica, a biomassa e o hidrogênio verde.

Por outro lado, não foi identificada uma meta quantitativa para emissões de escopo 3 em grande parte das empresas analisadas, tanto brasileiras quanto estrangeiras. A exceção foi a Vale, cujas emissões de escopo 3 – principalmente processamento, transporte

e uso de produtos vendidos – respondem por quase a totalidade da pegada de GEE da empresa. No setor petrolífero, apesar de a maior parte das emissões ocorrer no escopo 3, ambas as corporações estudadas não possuem metas relacionadas. Nas empresas siderúrgicas analisadas, a maior parcela das emissões provém do escopo 1. Contudo, os valores referentes ao escopo 3 também são consideráveis. Observa-se que, muitas vezes, as metas das empresas visam somente as emissões operacionais, fornecendo uma visão pouco abrangente dos reais impactos de compromissos de redução de emissões.

Em síntese, é possível notar que a Petrobras, Vale e Gerdau seguem seus próprios caminhos rumo à descarbonização, com algumas semelhanças em suas estratégias. As três empresas publicam regularmente relatórios sobre práticas ESG e divulgam seus inventários de GEE como parte do compromisso com a transparência e a sustentabilidade. Adicionalmente, as metas de médio prazo das emissões operacionais seguem a mesma linha, com exceção da Gerdau, cujo compromisso objetiva reduzir sua intensidade de emissões, e não suas emissões absolutas.

Como citado anteriormente, somente a Vale possui meta de médio prazo para o escopo 3. No longo prazo, nenhuma empresa firmou um compromisso nesse escopo, apesar de todas objetivarem atingir o *Net Zero* nas emissões operacionais até 2050, sendo a Vale pioneira em anunciar esse compromisso. Por outro lado, a mineradora foi a única das três empresas a não firmar um objetivo em relação à sua intensidade de emissões. Logo, metas mais abrangentes, ambiciosas e que retratem de forma transparente as reais perspectivas das empresas são cruciais para percorrer o longo e importante caminho rumo às emissões líquidas zero.

Visto que os planos de descarbonização podem ser atualizados anualmente pelas empresas, propõe-se uma contínua análise das metas e estratégias vinculadas, assim como a comparação entre planos de descarbonização antigos e vigentes, a fim de constatar se as empresas estão evoluindo ou não em seus objetivos. No presente trabalho, essa comparação pôde ser realizada somente com a Petrobras, uma vez que a Vale e a Gerdau anunciaram metas que, até então, não foram modificadas.

Em suma, o estudo dos planos de descarbonização das empresas foi oportuno para a análise de suas metas e para uma visualização mais abrangente de suas estratégias de redução de emissões. Sendo assim, é possível concluir que esta pesquisa conseguiu alcançar seus objetivos predeterminados. Vale destacar que, a fim de combater as mudanças climáticas e promover o desenvolvimento sustentável, ações de descarbonização estão sendo cada vez mais implantadas em diferentes setores, seja no âmbito privado ou governamental.

Referências

ALFAR, A. J.; ELHEDDAD, M.; DOYTCH, N. *Impact of political conflict on foreign direct investments in the mining sector: Evidence from the event study and spatial estimation*. Reino Unido: Journal of Environmental Management, 2023.

AMBIENTE, M. do M. *Protocolo De Quioto*. 2022. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/protocolo-de-quioto.html>>. Acesso em: 01 mai. 2022.

ANP. *ANP publica dados nacionais consolidados do setor de petróleo, gás natural e biocombustíveis de 2020*. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/anp-publica-dados-consolidados-do-setor-nacional-de-petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis-em-2020>. Acesso em: 06 jun. 2022.

ARCELORMITTAL. *Relatório de Sustentabilidade ArcelorMittal 2022*. 2023. Disponível em: <<https://brasil.arcelormittal.com/relatorio-de-sustentabilidade/assets/images/relatorio-de-sustentabilidade-2022.pdf>>. Acesso em: 28 mai. 2024.

AROMI, D.; CLEMENTS, A. *Spillovers between the oil sector and the S&P500: The impact of information flow about crude oil*. Argentina: Energy Economics, 2019.

BASTOS, M. M. T. *Governança, Desenho Institucional e Regulação no Setor Mineral Brasileiro*. Rio de Janeiro: Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Economia, Programa de Pós-Graduação em Políticas Públicas, Estratégias e Desenvolvimento, 2018.

BATISTA, D. C. *Classificação e caracterização dos resíduos do beneficiamento da sucata de ferro e aço utilizada no processo siderúrgico para identificação da viabilidade de aplicações*. São Carlos: Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014.

BERGMAN-FONTE, C. et al. *Repurposing, co-processing and greenhouse gas mitigation – The Brazilian refining sector under deep decarbonization scenarios: A case study using integrated assessment modeling*. Rio de Janeiro: Energy, 2023.

BHASKAR, A.; ASSADI, M.; SOMEHSARAEI, H. N. *Decarbonization of the Iron and Steel Industry with Direct Reduction of Iron Ore with Green Hydrogen*. Noruega: MDPI, 2019.

BHP. *Operational decarbonisation investor briefing*. 2023. Disponível em: <https://www.bhp.com/-/media/documents/media/reports-and-presentations/2023/230621_operationaldecarbonisationinvestorbriefing_slidesspeakernotes.pdf>. Acesso em: 14 mai. 2024.

BRANCA, T. A. et al. *The Challenge of Digitalization in the Steel Sector*. Itália: MDPI, 2020.

BRASIL, I. A. *Gerdau é a empresa industrial com melhor reputação no Brasil na categoria Mineração, Siderurgia e Metalurgia*. 2022. Disponível em: <<https://acobrasil.org.br/site/noticia/gerdau-e-a-empresa-industrial-com-melhor-reputacao-no-brasil-na-categoria-mineracao-siderurgia-e-metalurgia>>. Acesso em: 21 mar. 2024.

BRASIL, I. A. *Parque siderúrgico*. 2024. Disponível em: <<https://acobrasil.org.br/site/parque-siderurgico/>>. Acesso em: 02 fev. 2024.

BRINO, M. L. de. *Companhia Electro Metalúrgica Brasileira: opções e disputas tecnológicas durante a década de 1920*. Campinas: Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, 2019.

CARVALHO, L. S. L. da S. *A mineração responsável: limites para a auto regulação socio-ambiental do setor mineral no Brasil*. São Paulo: Tese (Doutorado em Direito Econômico e Financeiro) - Faculdade de Direito, Universidade de São Paulo, 2014.

CARVALHO, N. et al. *How likely is Brazil to achieve its NDC commitments in the energy sector? A review on Brazilian low-carbon energy perspectives*. Rio de Janeiro: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020.

CASTRO, P. H. de. *Influência da relação com os stakeholders na presença de indicadores de sustentabilidade: estudos de casos no setor de mineração do Brasil*. São Paulo: Dissertação (Mestrado em Administração) - Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, 2019.

CEBDS. *O que é o Acordo de Paris?* 2019. Disponível em: <<https://cebds.org/o-que-e-o-acordo-de-paris/#.Ym781drMLIU>>. Acesso em: 01 mai. 2022.

CHEREPOVITSYN, A.; RUTENKO, E. *Strategic Planning of Oil and Gas Companies: The Decarbonization Transition*. Rússia: Energies, 2022.

CHEREPOVITSYNA, A. et al. *Decarbonization Measures: A Real Effect or Just a Declaration? An Assessment of Oil and Gas Companies' Progress towards Carbon Neutrality*. Rússia: MDPI, 2023.

CIRINEU, G. R. F. *"AÇO VERDE": estado da arte, desafios e perspectivas para a siderurgia sustentável no Brasil*. São Carlos: Trabalho de conclusão de curso - Departamento de Engenharia de Materiais, UFSCar, 2023.

CNN. *Conselho da Petrobras aprova plano estratégico sem "cavalo de pau"*. 2022. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/economia/conselho-da-petrobras-aprova-plano-estrategico-sem-cavalo-de-pau/>>. Acesso em: 23 abr. 2024.

COUTO, A. B. G. do; RANGEL, L. A. D. *Corporate governance aspects in sustainability and performance assessment models for energy companies: a systematic review of the literature*. Niterói: Gestão & Produção, 2023.

DIPLOMATIQUE, L. M. *A movimentação da Petrobras contrária à transição energética*. 2023. Disponível em: <<https://diplomatique.org.br/a-movimentacao-da-petrobras-contraria-a-transicao-energetica/>>. Acesso em: 09 mai. 2024.

- ECONÔMICA, C. A. de D. *Indústria Siderúrgica*. 2022. Disponível em: <https://cdn.cade.gov.br/Portal/centrais-de-conteudo/publicacoes/estudos-economicos/cadernos-do-cade/Caderno_Industria-Siderurgica.pdf>. Acesso em: 07 jun. 2022.
- EMENEKWE, C. C. et al. *Macroeconomics of decarbonization strategies of selected global south countries: A systematic review*. Nigéria: *Frontiers in Environmental Science*, 2022.
- ENERGIA, M. de Minas e. *Mineração tem saldo de 49 bilhões de dólares em 2021 e garante balança comercial positiva*. 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2022/02/mineracao-tem-saldo-de-us-49-bilhoes-em-2021-e-garante-balanca-comercial-positiva>>. Acesso em: 06 jun. 2022.
- ENGIE. *Siderurgia aposta no hidrogênio verde para descarbonização*. 2023. Disponível em: <<https://www.alemnaenergia.engie.com.br/siderurgia-hidrogenio-verde/>>. Acesso em: 09 jun. 2024.
- EPE. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2030*. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/PDE%202030_RevisaoPosCP_rv2.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2024.
- EPE. *Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2021*. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-688/NT-EPE-DPG-SDB-2022-02_Analise_de_Conjuntura_dos_Biocombustiveis_2021.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2024.
- EPE. *Balanço Energético Nacional 2023*. 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>>. Acesso em: 08 jul. 2023.
- EPE. *Boletim de Conjuntura da Indústria do Óleo & Gás*. 2024. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-226/topico-706/BOG%202%C2%BAsemestre2023.pdf>>. Acesso em: 09 mar. 2024.
- EXXONMOBIL. *Advancing Climate Solutions*. 2023. Disponível em: <<https://corporate.exxonmobil.com/-/media/global/files/advancing-climate-solutions-progress-report/2023/2023-acs-progress-report-executive-summary.pdf>>. Acesso em: 19 abr. 2024.
- FAYOMI, O. S. I.; AKANDE, I. G.; ODIGIE, S. *Economic Impact of Corrosion in Oil Sectors and Prevention: An Overview*. Nigéria: *Journal of Physics: Conference Series*, 2019.
- GANDRA, R. M.; JUNIOR, H. Q. P. *Modelo aplicado aos processos de tomada de decisões de investimento no segmento de exploração e produção da indústria de óleo e gás em ambiente de riscos e incertezas*. Rio de Janeiro: *Economia e Sociedade*, 2023.
- GARCIA, R.; SANTOS, U. P. dos; SUZIGAN, W. *Industrial upgrade, economic catch-up and industrial policy in Brazil: general trends and the specific case of the mining industry*. Campinas: *Nova Economia*, 2020.
- GARLET, T. B. et al. *Unlocking Brazil's green hydrogen potential: Overcoming barriers and formulating strategies to this promising sector*. Porto Alegre: *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023.

GENTIL, P. P. de C. et al. *Governança territorial e inovação social nos processos de desenvolvimento regional em territórios de mineração: um modelo teórico em construção*. Belo Horizonte: Cadernos EBAPE.BR, 2019.

GERDAU. *O Compromisso da Gerdau com as Mudanças Climáticas*. 2022. Disponível em: <<https://www2.gerdau.com.br/wp-content/uploads/2022/03/ESG-comunicacao-metas-de-carbono.pdf>>. Acesso em: 05 jun. 2023.

GERDAU. *Relatório Anual 2022*. 2022. Disponível em: <<https://api.mziq.com/mzfilemanager/v2/d/21e1d193-5cab-456d-8bb8-f00a49a43c1c/9fb4daf3-9c5c-e4ad-3433-f597017fca9e?origin=1>>. Acesso em: 27 mai. 2024.

HAFEEZ, A. *NIOSH Oil and Gas Sector Program*. Índia: [s.n.], 2023.

HEBEDA, O. et al. *Pathways for deep decarbonization of the Brazilian iron and steel industry*. Rio de Janeiro: Journal of Cleaner Production, 2023.

IBP. *Maiores produtores mundiais de petróleo em 2021*. 2022. Disponível em: <<https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/snapshots/maiores-produtores-mundiais-de-petroleo-em-2020/>>. Acesso em: 17 jun. 2023.

IBRAM. *Desempenho da mineração tem queda em 2022, mas setor cria mais empregos e aumentará investimentos para US\$ 50 bi até 2027*. 2023. Disponível em: <<https://ibram.org.br/noticia/desempenho-da-mineracao-tem-queda-em-2022-mas-setor-cria-mais-empregos-e-aumentara-investim>>. Acesso em: 16 mar. 2024.

INEEP. *A ênfase na descarbonização e a lacuna do hidrogênio no Plano Estratégico da Petrobras 2024-2028+*. 2024. Disponível em: <<https://ineep.org.br/a-enfase-na-descarbonizacao-e-a-lacuna-do-hidrogenio-no-plano-estrategico-da-petrobras-2024-2028>>. Acesso em: 22 abr. 2024.

IPEA. *História - Rio-92*. 2009. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/desafios/index.php?option=com_content&id=2303:catid=28&Itemid>. Acesso em: 01 mai. 2022.

JOHNSON, S.; DENG, L.; GENCER, E. *Environmental and economic evaluation of decarbonization strategies for the Indian steel industry*. Estados Unidos: Energy Conversion and Management, 2023.

JR. Álvaro Alves de M.; SILVA, V. B. S. *Setor de petróleo e gás no Brasil: uma análise da atividade recente a partir do modelo ECD*. 2019. Disponível em: <https://www.mackenzie.br/fileadmin/ARQUIVOS/Public/6-pos-graduacao/upm-higienopolis/mestrado-doutorado/economia_mercados/2020/Anais_de_Congresso/>. Acesso em: 06 jun. 2022.

KALANTARI, H.; SASMITO, A. P.; GHOREISHI-MADISEH, S. A. *An overview of directions for decarbonization of energy systems in cold climate remote mines*. Canadá: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021.

KALLAI, J. *Governança ambiental do setor de mineração transnacional: o impacto de códigos de conduta nas emissões de gases de efeito estufa*. São Paulo: Dissertação (Mestrado em Relações Internacionais) - Instituto de Relações Internacionais, Universidade de São Paulo, 2021.

KARLSSON, I. et al. *Roadmap for Decarbonization of the Building and Construction Industry—A Supply Chain Analysis Including Primary Production of Steel and Cement*. Suécia: MDPI, 2020.

KERAMIDAS, K.; MIMA, S.; BIDAUD, A. *Opportunities and roadblocks in the decarbonisation of the global steel sector: A demand and production modelling approach*. França: Energy and Climate Change, 2023.

LEFEVRE, J.; WILLS, W.; HOURCADE, J.-C. *Combining low-carbon economic development and oil exploration in Brazil? An energy–economy assessment*. França: Climate Policy, 2018.

LIU, Y. et al. *Environmental and economic sustainability of key sectors in China's steel industry chain: An application of the Emergy Accounting approach*. China: Ecological Indicators, 2021.

LOPES, J. C.; DEMAJOROVIC, J. *Responsabilidade Social Corporativa: uma visão crítica a partir do estudo de caso da tragédia socioambiental da Samarco*. São Paulo: Cadernos EBAPE.BR, 2020.

MANCINI, L.; PAZ, M. J. *Oil sector and technological development: Effects of the mandatory research and development (R&D) investment clause on oil companies in Brazil*. Espanha: Resources Policy, 2018.

MANCINI, L.; SALA, S. *Social impact assessment in the mining sector: Review and comparison of indicators frameworks*. Itália: Resources Policy, 2018.

MCTI. *Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima - IPCC*. 2023. Disponível em: <https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/ciencia_do_clima/painel_intergovernamental_sobre_mudanca_do_clima.html> Acesso em: 24 mai. 2023.

MERCO. *Ranking Merco chega à sua décima edição e se consolida como a mais completa referência para a avaliação de Reputação Corporativa*. 2024. Disponível em: <<https://www.merco.info/br/actualidad/merco-ranking-llega-a-su-decima-edicion-y-se-consolida-como-el-referente-mas-completo-para-evalu>> Acesso em: 21 mar. 2024.

MILANEZ, B.; MAGNO, L.; PINTO, R. G. *Da política fraca à política privada: o papel do setor mineral nas mudanças da política ambiental em Minas Gerais, Brasil*. Juiz de Fora: Cadernos de saúde pública, 2019.

MOISE, G. M. *Corruption in the oil sector: A systematic review and critique of the literature*. Irlanda: The Extractive Industries and Society, 2020.

MURTA, M. A. *O gerenciamento de risco como alternativa para redução de desastres ambientais com mineração no Brasil*. Brasília: Dissertação - Programa de Mestrado em Direito e Políticas Públicas, UniCEUB, 2020.

NETO, J. B. S.; BORGES, J. F. *As narrativas dos stakeholders sob a perspectiva da estratégia como prática social*. Ribeirão Preto: RAM - Revista de Administração Mackenzie, 2019.

OBODAI, J.; MOHAN, G.; BHAGWAT, S. *Beyond legislation: Unpacking land access capability in small-scale mining and its intersections with the agriculture sector in sub-Saharan Africa*. Reino Unido: The Extractive Industries and Society, 2023.

OLIVEIRA, M. F. D. *Manufatura 4.0: a indústria do petróleo e a transformação digital*. Niterói: Dissertação - Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia de Produção, UFF, 2019.

PEIXOTO, F. da S.; SOARES, J. A.; RIBEIRO, V. S. *Conflitos pela água no Brasil*. Mossoró: Sociedade & Natureza, 2022.

PELLISSARI, M. R. et al. *Decarbonizing coal-fired power plants: Carbon capture and storage applied to a thermoelectric complex in Brazil*. São Paulo: Results in Engineering, 2023.

PETROBRAS. *Petrobras aprova Plano Estratégico 2020-2024*. 2019. Disponível em: <<https://static.poder360.com.br/2019/11/Petrobras-PNG-2020-24.pdf>>. Acesso em: 16 abr. 2024.

PETROBRAS. *Petrobras - Fatos e Dados - Divulgamos o Caderno de Mudança do Clima*. 2022. Disponível em: <<https://petrobras.com.br/fatos-e-dados/divulgamos-o-caderno-de-mudanca-do-clima-com-resultados-e-acoes-em-curso-para-reducao-de-emissao>>. Acesso em: 01 mai. 2022.

PETROBRAS. *Caderno do Clima*. 2023. Disponível em: <<https://petrobras.com.br/pt/sociedade-e-meio-ambiente/meio-ambiente/mudancas-do-clima/>>. Acesso em: 26 mai. 2023.

PUCCI, R. F. *O RenovaBio, os Créditos de Descarbonização e a Governança Climática Global*. Campinas: Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Economia, 2021.

REHMAN, G. et al. *Impacts of mining on local fauna of wildlife in District Mardan & District Mohmand Khyber Pakhtunkhwa Pakistan*. Paquistão: Brazilian Journal of Biology, 2024.

REVIEW, M. T. *O que você precisa saber sobre mineração e mudanças climáticas*. 2023. Disponível em: <<https://mittechreview.com.br/o-que-voce-precisa-saber-sobre-mineracao-e-mudancas-climaticas/>>. Acesso em: 13 abr. 2024.

REZMERITA, E. et al. *Urban Air Quality Monitoring in Decarbonization Context; Case Study—Traditional Coal Mining Area, Petrosani, Romania*. Romênia: MDPI, 2022.

RODRIGUES, L. dos A.; FERES, J. G. *Inovação no setor de biodiesel dos principais países produtores: o papel da demanda induzida entre 2000 e 2011*. Varginha: Revista de Economia e Sociologia Rural, 2022.

ROSSETTO, D. *The long-term feasibility of border carbon mechanisms: An analysis of measures proposed in the European Union and the United States and the steel production sector*. Australia: Sustainable Horizons, 2023.

SAES, B. M. et al. *Justiça ambiental e irresponsabilidade social corporativa: o caso da mineradora Vale S.A*. Osasco: Ambiente & Sociedade, 2021.

- SANI, L. et al. *Decarbonization pathways for the power sector in Sumatra, Indonesia*. Suécia: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021.
- SANTIAGO, A. L. F. *Licença Social para Operar – Relacionamento da empresa com a comunidade local: critérios de influência para a concessão da LSO. Um estudo de caso da mineração brasileira*. Espanha: Tese (Doutorado em Empresa, Economia e Sociedade) – Universidad de Alicante, 2016.
- SCHUTTE, G. R. *A economia política do conteúdo local no setor petrolífero de Lula a Temer*. São Bernardo do Campo: Economia e Sociedade, 2021.
- SILVA, D. C. F. da. *Os principais desafios do uso do hidrogênio no contexto brasileiro para a descarbonização: uma breve revisão bibliográfica*. Rio de Janeiro: Instituto de Energia da PUC-Rio – IEPUC, 2021.
- SILVA, G. de S. S. *Contribuições econômica, social e ambiental do setor siderúrgico de Açailândia (MA) para o desenvolvimento regional*. Taubaté: Dissertações - Gestão e Desenvolvimento Regional (Mestrado Profissional) - PPGA/MGDR, 2019.
- SILVA, G. T. F. da; FERRAZ, C. *Desafios à estruturação de um plano de investimento público para o setor energético brasileiro*. Niterói: Sobre a Associação Keynesiana Brasileira-AKB, 2022.
- SOUZA, A. H. de. *Estudo comparativo das técnicas de filtragem aplicadas a rejeitos de minério de ferro provenientes da etapa de deslamagem*. Ouro Preto: Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais da Redemat, 2020.
- SOUZA, J. F. T. de; PACCA, S. A. *Carbon reduction potential and costs through circular bioeconomy in the Brazilian steel industry*. São Paulo: Resources, Conservation and Recycling, 2021.
- SOUZA, J. F. T. de; PACCA, S. A. *A low carbon future for Brazilian steel and cement: A joint assessment under the circular economy perspective*. São Paulo: Resources, Conservation & Recycling Advances, 2023.
- TESKE, S. et al. *1.5 °C pathways for the Global Industry Classification (GICS) sectors chemicals, aluminium, and steel*. Austrália: PubMed, 2022.
- TORRE, N. M. de M.; BRANDALISE, N.; BONAMIGO, A. *Economic feasibility analysis for insourcing hydraulic maintenance services using the Monte Carlo method*. Volta Redonda: Gestão & Produção, 2023.
- TRIPATHY, P. P.; KALBAR, P. P.; MODI, A. *An analysis of sub-sectoral level carbon budget allocation for India's iron and steel sector*. Índia: Journal of Cleaner Production, 2023.
- VALE. *Mudanças Climáticas*. 2019. Disponível em: <<http://www.vale.com/esg/pt/Paginas/MudancasClimaticas.aspx>> Acesso em: 01 mai. 2022.
- VALE. *Relatório sobre Mudanças Climáticas*. 2021. Disponível em: <<https://vale.com/documents/d/guest/vale-ccr-2021-pt>>. Acesso em: 30 mai. 2023.

VALE. *Vale publica o primeiro relatório sobre mudanças climáticas alinhado às recomendações da Task Force on Climate Related Financial Disclosures*. 2021. Disponível em: <<https://vale.com/pt/w/vale-publica-o-primeiro-relatorio-sobre-mudancas-climaticas-alinhado-as-recomendacoes-da-task-for>>. Acesso em: 11 mai. 2024.

VALE. *Vale leva à COP 27 experiências bem-sucedidas de redução de emissões de carbono e de recuperação de florestas*. 2022. Disponível em: <<https://vale.com/pt/w/vale-leva-%C3%A0-cop-27-experi%C3%Aancias-bem-sucedidas-de-redu%C3%A7%C3%A3o-de-emiss%C3%B5es-de-carbono-e-de-recupera%C3%A7%C3%A3o-de-florestas>>. Acesso em: 17 mai. 2024.

VIGOYA, M. F.; MENDOZA, J. G.; ABRIL, S. O. *International Energy Transition: A Review of its Status on Several Continents*. Colômbia: EconJournals, 2020.

WATCH, C. M. *Corporate Climate Responsibility Monitor*. 2022. Disponível em: <<https://carbonmarketwatch.org/publications/ccrm.2022/>>. Acesso em: 25 mai. 2024.

WORLDSTEEL. *Climate Action at worldsteel*. 2023. Disponível em: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Climate-Action-at-worldsteel_Asa-Ekdahl.pdf#:~:text=In%202020,%20on%20average,%20every%20tonne%20of%20steel>. Acesso em: 04 out. 2024.