DESCARBONIZAÇÃO
DA INDÚSTRIA DE BASE

BNDES

PRESIDENTE DA REPÚBLICA
Luiz Inácio Lula da Silva

MINISTRO DE ESTADO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS
Geraldo José Rodrigues Alckmin Filho

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL

PRESIDENTE
Aloizio Mercadante Oliva

DIRETORIA
Alexandre Correa Abreu
Helena Tenório Veiga de Almeida
José Luis Pinho Leite Gordon
Luciana Aparecida da Costa
Luiz Augusto Fraga Navarro de Britto Filho
Maria Fernanda Ramos Coelho
Nelson Henrique Barbosa Filho
Tereza Helena Gabrielli Barreto Campello
Walter Baère de Araújo Filho

DESCARBONIZAÇÃO
DA INDÚSTRIA DE BASE

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL

DESCARBONIZAÇÃO
DA INDÚSTRIA DE BASE

Novembro, 2024

BNDES

SUMÁRIO

Lista de tabelas, gráficos, figuras, quadros e boxes 7

Lista de siglas 9

PREFÁCIO 12

INTRODUÇÃO 14

TRANSIÇÃO PARA ECONOMIA DE BAIXO CARBONO: O PAPEL DA INDÚSTRIA 18

Cenários climáticos para o Brasil e políticas para descarbonização 19

Contribuições das indústrias de base na transição para economia de baixo carbono 25

Tecnologias transversais 28

ROTAS PARA A DESCARBONIZAÇÃO POR SETOR 31

Indústria de cimento 31

Principais processos emissores 31

Rotas de descarbonização da indústria de cimento 33

Indústria siderúrgica 39

Principais processos emissores 40

Rotas de descarbonização da indústria siderúrgica 42

Indústria de mineração 55

Principais processos emissores 55

Rotas de descarbonização da indústria de mineração 56

Indústria química 66

Principais processos emissores 67

Rotas de descarbonização da indústria química 68

Indústria de fertilizantes 76

Principais processos emissores 78

Rotas de descarbonização da indústria de fertilizantes 79

Indústria de base florestal 84
Principais processos emissores 85
Rotas de descarbonização da indústria de base florestal 88

DESAFIOS PARA OS INVESTIMENTOS EM DESCARBONIZAÇÃO 95
Desafios para a indústria de cimento 99
Desafios para a indústria siderúrgica 100
Desafios para a indústria de mineração 102
Desafios para a indústria química 103
Desafios para a indústria de fertilizantes 105
Desafios para a indústria de base florestal 105

O PAPEL DO BNDES 107
Apoio histórico às indústrias de base 107
Políticas e ações para investimentos futuros em descarbonização 109
Contribuições do BNDES na agenda de descarbonização da política industrial 110
Instrumentos para incentivar o investimento na descarbonização da indústria 112

CONSIDERAÇÕES FINAIS 115

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 118

Lista de tabelas

TABELA 1. Emissões globais de GEEs por indústria de base – 2014 15
TABELA 2. Emissões brasileiras de GEEs por indústria em 2022 16
TABELA 3. Estimativa de emissões de CO2e pelas associadas do Aço Brasil (tCO2e/t aço bruto) 42
TABELA 4. Balanço de emissões e remoções em tCO2e 84

Lista de gráficos

GRÁFICO 1. Emissões globais de GEEs em MtCO2e – 2014 15
GRÁFICO 2. Emissões brasileiras de GEEs em MtCO2e – 2022 16
GRÁFICO 3. Participação das emissões absolutas de GEEs por uso da energia – Brasil (2021) 20
GRÁFICO 4. Consumo de energia por fonte e setor – 2032 20
GRÁFICO 5. Cenários de energia primária por fonte – 2050 22
GRÁFICO 6. Contribuição potencial para redução de emissões por tecnologia para a indústria – 2030 (GtCO2eq) 24
GRÁFICO 7. Redução de emissões diretas de CO_2 39
GRÁFICO 8. Matriz elétrica 89
GRÁFICO 9. Intensidade carbônica na produção de aço via rota EAF (2019) 101
GRÁFICO 10. Intensidade carbônica na produção de aço via rota BF/BOF (2019) 101
GRÁFICO 11. Comparação dos custos do gás natural e do biometano (2018) 104

Lista de figuras

FIGURA 1. Contribuição da indústria siderúrgica para a transição 26
FIGURA 2. Processo de produção do cimento 32
FIGURA 3. Rotas para redução das emissões de CO_2 na indústria brasileira de cimento 33
FIGURA 4. Principais rotas de produção siderúrgicas e fluxo de materiais em 2019 41
FIGURA 5. Processo simplificado da rota integrada via alto-forno 42
FIGURA 6. Comparação entre a rota convencional e a autorredução 49
FIGURA 7. Comparação entre fornos de O_2 e H_2 e a evolução das rotas tecnológicas 52
FIGURA 8. Exemplo de processo simplificado da redução direta a hidrogênio 53
FIGURA 9. Eletrólise de óxido fundido 54
FIGURA 10. Potencial reorganização da cadeia de valor da produção de ferro e aço 62
FIGURA 11. Comparação entre briquetagem, pelotização e sinterização 63
FIGURA 12. Cadeia produtiva da indústria petroquímica 66
FIGURA 13. Processo simplificado de produção de metanol 67
FIGURA 14. Comparação do processo produtivo do eteno verde e do eteno petroquímico 73
FIGURA 15. Produção de combustíveis líquidos a partir do biogás e do biometano 75
FIGURA 16. Produção de metanol renovável 76
FIGURA 17. Processo produtivo simplificado da indústria de fertilizantes 77
FIGURA 18. Processo simplificado de produção de amônia 78
FIGURA 19. Processo produtivo da floresta 85

FIGURA 20. Processo produtivo da celulose 87
FIGURA 21. Contribuição da indústria de base florestal para a economia de baixo carbono 88
FIGURA 22. Ciclo de recuperação química e energética 93
FIGURA 23. Fases de implementação do mecanismo de ajuste de fronteiras de carbono (CBAM) 96
FIGURA 24. Biomassa – emissões biogênicas e a cadeia de valor 98
FIGURA 25. Plano de ação da Nova Indústria Brasil 111

Lista de quadros

QUADRO 1. Rotas para descarbonização da siderurgia 43
QUADRO 2. Rotas para descarbonização da indústria de mineração 57
QUADRO 3. Diferentes tipos de DRI/HBI por processo siderúrgico 61
QUADRO 4. Rotas para descarbonização na indústria de química 69
QUADRO 5. Rotas para descarbonização na indústria de fertilizantes 79
QUADRO 6. Rotas para descarbonização na indústria de base florestal 89
QUADRO 7. Sumário de rotas de descarbonização das indústrias de base 116

Lista de boxes

BOX 1. Casos de energia renovável 34
BOX 2. Casos de combustíveis alternativos 36
BOX 3. Casos de adições e substitutos de clínquer 38
BOX 4. Caso de carvão vegetal (*biocoke*) 46
BOX 5. Caso de sucata 47
BOX 6. Caso de uso de gás natural 48
BOX 7. Caso de autorredução 50
BOX 8. Caso de fonte de energia de baixo carbono de escopo 1 58
BOX 9. Caso de fontes de energia de baixo carbono de escopo 2 59
BOX 10. Caso de eletrificação 60
BOX 11. Caso de aglomerado verde 64
BOX 12. Caso de fonte de energia de baixo carbono de escopo 3 65
BOX 13. Caso de redução de emissão de N_2O 70
BOX 14. Casos de eficiência energética e fontes de energia renovável 71
BOX 15. Caso de matérias-primas renováveis 73
BOX 16. Caso de redução de emissão de N_2O 80
BOX 17. Casos de eficiência energética e de fontes de energia renovável 81
BOX 18. Caso de biogás e biometano 82
BOX 19. Casos de eficiência energética e de fontes de energia renovável 91
BOX 20. Casos de redução de emissões em transporte 94
BOX 21. Custo de emissão do carbono e o prêmio verde 97

Lista de siglas

Abal	Associação Brasileira do Alumínio
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
Abiquim	Associação Brasileira da Indústria Química
ABM	Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABTCP	Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel
AMA Brasil	Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração
Anda	Associação Nacional para Difusão de Adubos
BECCS	*bioenergy with carbon capture and storage*
BF	*blast furnace*/alto-forno
BID	Banco Interamericano de Desenvolvimento
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BOF	*basic oxygen furnace*/conversor a oxigênio
CAIT	Climate Analysis Indicators Tool
CBAM	*carbon border adjustment mechanism*
CBMM	Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração
CCUS	*carbon capture and utilization or storage*/ captura, armazenamento e/ou uso de carbono
CDR	combustíveis derivados de resíduos
CDRU	combustível derivado de resíduo sólido urbano
Cebri	Centro Brasileiro de Relações Internacionais
Cepal	Comissão Econômica para a América Latina
CER	Certificado de Energia Renovável
CNDI	Conselho Nacional de Desenvolvimento Industrial
CO2e	dióxido de carbono equivalente
COPPE	Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia
CRU	Commodities Research Unit Group
CSA	Companhia Siderúrgica do Atlântico
CSP	Companhia Siderúrgica do Pecém
CST	Companhia Siderúrgica de Tubarão
CTO	*crude tall oil*
DAP	fosfato diamônico

DRI	*direct reduced iron*/ferro-esponja
EAF	*electric arc furnace*
Embrapii	Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETS	Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia
FAT	Fundo de Amparo ao Trabalhador
Finep	Financiadora de Estudos e Projetos
FMI	Fundo Monetário Internacional
GEE	gás de efeito estufa
GJ	gigajoules
GN	gás natural
HBI	*hot briquetted iron*
HVO	oléo vegetal hidrotratado
IABr	Instituto Aço Brasil
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
Ibram	Instituto Brasileiro de Mineração
IBRE/FGV	Instituto Brasileiro de Economia da Fundação Getúlio Vargas
ICFPA	International Council of Forest and Paper Associations
IEA	International Energy Agency
IMA	incremento médio anual
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRA	Inflation Reduction Act
JBIC	Japan Bank for International Cooperation
KCL	cloreto de potássio
KFW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
MAP	fosfato monoamônico
MCTI	Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação
MDIC	Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços
MF	Ministério da Fazenda
MMA	Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima
MPO	Ministério do Planejamento e Orçamento
NDB	New Development Bank
NDC	contribuição nacionalmente determinada

NIB	Nova Indústria Brasil
NPK	nitrogênio, fósforo e potássio
OMC	Organização Mundial do Comércio
OMI	Organização Marítima Internacional
ONU	Organização das Nações Unidas
P&D	pesquisa e desenvolvimento
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
PCI	injeção de carvão pulverizado
PNMC	Política Nacional sobre Mudança do Clima
RSU	resíduos sólidos urbanos
SAF	*submerged arc furnace*/forno a arco submerso
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
Sinprifert	Sindicato Nacional das Indústrias de Matérias-Primas para Fertilizantes
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
SSP	superfosfato simples
TA	transição alternativa
TB	transição brasileira
TEPS	tonelada equivalente de petróleo
TG	transição global
TR	taxa referencial
TSP	superfosfato triplo
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
US DOE	United States Department of Energy
WHRS	*waste heat recovery system*
WSA	World Steel Association

PREFÁCIO

A transição justa para uma economia de baixo carbono tem se tornado um grande direcionador da política industrial em diversos países. No Brasil, esse direcionamento está refletido nas missões instituídas pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Industrial (CNDI) para a nova política industrial e nos eixos do Plano de Transição Ecológica, mostrando o alinhamento de política pública ao propósito.

O Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), parte ativa do processo, está comprometido em continuar exercendo seu papel histórico como implementador e impulsionador de políticas estruturadas para o desenvolvimento da economia brasileira. Entendendo o estabelecimento de uma economia de baixo carbono como uma oportunidade para reverter a desindustrialização precoce ocorrida no Brasil, o Banco busca promover a reindustrialização em novas bases: verde, inovadora, digital e inclusiva, ampliando a complexidade do tecido industrial (bens e serviços de maior valor agregado).

Com o intuito de aprofundar a compreensão sobre as iniciativas e necessidades da indústria para o avanço na transição para uma economia de baixo carbono, o BNDES sediou, em 2023, um ciclo de seminários sobre a descarbonização das indústrias de base. Entre maio e outubro, foram realizados seis encontros, frutos da construção conjunta das equipes do Departamento de Indústrias de Base e Extrativa (DEBASE) e do Departamento de Clima (DCLIMA) do BNDES. Esses encontros contaram com a colaboração direta de entidades representativas das indústrias de cimento, fertilizantes, siderurgia, química, base florestal e mineração, além de parcerias com o Governo Federal, notadamente o Conselho Nacional de Desenvolvimento Industrial do Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC) e a Secretaria de Relações Institucionais da Presidência da República, além da academia.

O Seminário de Descarbonização da Indústria de Base proporcionou um conteúdo profundo e diversificado, transformando experiências em conhecimento compartilhado. De forma geral, os representantes da indústria trouxeram um panorama abrangente de cada setor, descrevendo a evolução e o mercado atual, explicando seus processos produtivos, identificando as fontes de emissões de gases de efeito estufa e delineando suas agendas de descarbonização. As empresas apresentaram suas perspectivas e casos de sucesso, ilustrando diferentes pilares das rotas de descarbonização. Cada encontro foi concluído com um rico debate, cujas reflexões influenciaram estudos, análises e colaborações do BNDES nos meses subsequentes.

CICLO SEMINÁRIO DE DESCARBONIZAÇÃO DA INDÚSTRIA DE BASE			
INDÚSTRIA	**ASSOCIAÇÕES**	**EMPRESAS PARTICIPANTES**	**DATA**
CIMENTO	Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (Snic)	Ciplan, Nacional, Intercement, Votorantim, Mizu, Apodi e Itambé	25.5.2023
FERTILIZANTES	Associação Nacional para Difusão de Adubos (Anda), Sindicato Nacional das Indústrias de Matérias-Primas para Fertilizantes (Sinprifert) e Associação Misturadores de Adubo do Brasil (AMA Brasil)	Yara, Mineração Curimbaba, Mosaic e Morro Verde	6.6.2023
AÇO	Instituto Aço Brasil (IABr) e Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM)	ArcelorMittal, Gerdau, Ternium e GaveaTech	11.7.2023
QUÍMICA	Associação Brasileira da Indústria Química (Abiquim)	Kurita, Rhodia Solvay e Braskem	22.8.2023
FLORESTAL	Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ) e Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel (ABTCP)	CMPC, Copapa, Irani e Klabin	19.9.2023
MINERAL	Instituto Brasileiro de Mineração (Ibram) e Associação Brasileira do Alumínio (Abal)	Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM), Kinross, Sigma e Vale	3.10.2023

É com grande satisfação que apresentamos este texto, que consolida não apenas as principais rotas de descarbonização das indústrias de base, mas também as experiências trazidas pelos participantes dos seminários e soluções de financiamento do BNDES destinadas a apoiar o avanço da transição para uma economia de baixo carbono.

Gostaríamos de expressar nosso sincero agradecimento aos presidentes das entidades parceiras, representantes de governo e a todos que dedicaram seu tempo e recursos a um tema marcado pelo senso de urgência. Suas valiosas contribuições foram fundamentais para a criação de um material que busca promover o diálogo e ações direcionadas a uma indústria de base mais sustentável. Avançamos.

INTRODUÇÃO

A indústria de base desempenha um papel fundamental na vida moderna, pois é responsável por fornecer os insumos usados na fabricação de produtos finais mais complexos que sustentam a quase totalidade das demais atividades econômicas e sociais.

O desenvolvimento industrial, a infraestrutura e a urbanização foram construídos sobre produtos à base de aço, minérios, cimento, celulose e transformados químicos. A agropecuária, por sua vez, depende da indústria de fertilizantes para obter a produtividade necessária à segurança alimentar e à produção de biocombustíveis.

Percebemos, portanto, que os diversos setores da indústria de base desempenham um papel crítico no cotidiano: seus produtos são necessários para viabilizar alimentação, combustíveis, geração de energia, equipamentos, veículos, edifícios, produtos eletrônicos e plásticos, embalagens de papel, entre muitos outros.

A indústria de base ainda contribui com: geração de empregos bem remunerados e desenvolvimento local; divisas internacionais, por meio das exportações; receita para o governo via recolhimento de tributos; investimento privado em pesquisa e desenvolvimento (P&D); e outros serviços de alto valor agregado. Uma indústria de base competitiva é pré-condição para o desenvolvimento não apenas dos diversos setores a jusante, mas da economia como um todo.

No entanto, como veremos adiante, a indústria de base – em particular as indústrias de cimento, siderurgia, química e fertilizantes –, devido a seus processos produtivos de natureza intensiva em carbono e de alto consumo energético, é uma forte emissora de gases de efeito estufa (GEE).

A dependência que o estilo de vida da sociedade atual tem por produtos originados na indústria de base é mais um fator a tornar de particular dificuldade o abatimento de suas emissões de GEEs (*hard-to-abate sectors*). Conforme a população global cresce e as economias avançam, a produção e a demanda por materiais produzidos pela indústria de base também aumentam. Logo, evitar o aumento das emissões de GEEs depende da redução da intensidade carbônica[1] de seus produtos.

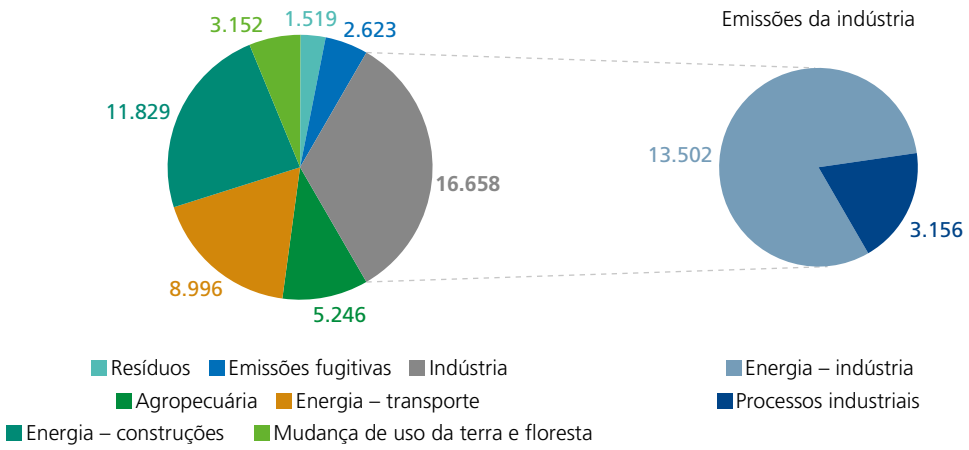
Segundo dados de Rissman e outros (2020),[2] os setores industriais foram responsáveis por 33% das emissões GEEs, totalizando 16.658 Mt de dióxido de carbono equivalente (CO_2e)

1 A intensidade carbônica é uma medida relativa que calcula a quantidade total de emissões de GEEs associadas à produção de uma quantidade de determinado produto, em geral expressa em termos de toneladas de dióxido de carbono equivalente por tonelada de produto (tCO_2e/t).

2 Os dados de Rissman e outros (2020) foram utilizados, apesar de serem de 2014, pois essa fonte, entre as disponíveis no mercado e na literatura, apresenta uma abertura e um detalhamento mais similares ao Brasil, permitindo melhor comparação entre os perfis de emissão mundial e brasileiro.

(Gráfico 1). Desse montante, 19% (equivalente a 3.156 Mt de CO2e) originaram-se diretamente dos processos produtivos industriais, enquanto os 81% restantes (13.502 Mt de CO2e) tiveram sua origem atribuída à energia utilizada.

GRÁFICO 1. Emissões globais de GEEs em MtCO2e – 2014



Fonte: Elaboração própria com base em dados de Rissman e outros (2020).

A indústria de base foi responsável por cerca de 73% das emissões globais de GEEs provenientes do setor industrial em 2014. Em relação à totalidade das fontes emissoras, a indústria de base representou aproximadamente 24% das emissões globais (Tabela 1). Tais valores justificam a atenção global dedicada à descarbonização das indústrias *hard-to-abate*.

TABELA 1. Emissões globais de GEEs por indústria de base – 2014

	MtCO2e 2014	INDÚSTRIA (%)		TOTAL (%)	
Indústria (Energia e processos industriais)	16.658	100,0		33,3	
Siderurgia	3.487	20,9		7,0	
Alumínio e outros metais	1.516	9,1		3,0	
Cimento*	2.808	16,9	72,6%	5,6	24,2%
Quimica	3.347	20,1		6,7	
Base florestal**	938	5,6		1,9	
Outros	4.562	27,4		9,1	

Fonte: Elaboração própria com base em Rissman e outros (2020).

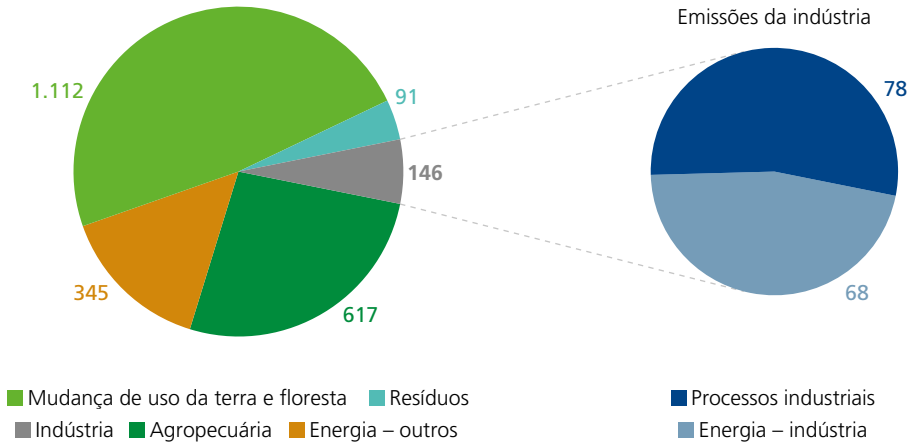
*Somatório da classificação original "cimento" e "cal".
**Somatório da classificação original "papel e celulose" e "madeira e produtos de madeira".

Em relação ao Brasil, segundo dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (Seeg),[3] em 2022, a indústria de base representou 6,3% das emis-

3 São utilizados dados de emissões brutas que o Observatório do Clima reporta no Seeg, com período mais recente disponível de 2022. Para os dados oficiais de emissões do país, estão disponíveis dados apenas até o ano de 2020, que tratam das emissões líquidas disponibilizadas na plataforma Sirene do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). Ver mais em Seeg (2022).

sões de GEEs, alcançando um total de 146 mil toneladas de CO2e (Gráfico 2). Dentro desse cenário, a indústria de base foi responsável por aproximadamente 67% das emissões totais do setor industrial.

GRÁFICO 2. Emissões brasileiras de GEEs em MtCO2e – 2022



Fonte: Elaboração própria com base nos dados do Seeg ([2023]). Disponível em: https://plataforma.seeg.eco.br/. Acesso em: 20 fev. 2024.

TABELA 2. Emissões brasileiras de GEEs por indústria em 2022

	MtCO2e 2022	INDÚSTRIA (%)		TOTAL (%)	
Indústria (energia e processos industriais)	146	100,0		6,3	
Metalurgia	47	32,2		2,0	
Cimento	34	23,5	66,5%	1,5	4,2%
Química	16	10,8		0,7	
Outros	49	33,5		2,1	

Fonte: Elaboração própria com base nos dados do Seeg ([2023]). Disponível em: https://plataforma.seeg.eco.br/. Acesso em: 20 fev. 2024.

Se, por um lado, a indústria de base enfrenta o desafio de reduzir emissões, por outro, ela fornecerá muitos dos principais insumos necessários para uma transição sustentável (IEA, 2020a). Espera-se que a indústria de base origine os materiais e componentes essenciais para a produção de tecnologias e infraestruturas sustentáveis, como energia renovável, veículos elétricos, sistemas de armazenamento de energia e construções eficientes. O desenvolvimento de cadeias de suprimentos verdes e a promoção de inovações tecnológicas na indústria de base são fundamentais para impulsionar a criação de uma economia mais sustentável e resiliente no longo prazo.

> A indústria está no centro do desenvolvimento de soluções de baixo carbono: é responsável pela geração de tecnologias como instalações de geração de eletricidade renovável, veículos não emissores e edifícios energeticamente eficientes. Portanto, é imperativo reduzir as emissões das operações industriais sem frear o fornecimento de tecnologias e

> infraestruturas transformacionais. Essas soluções devem ser compatíveis com um caminho que leve a zerar as emissões industriais (Rissman *et al.*, 2020, p. 2, tradução nossa).[4]

Considerando que a transição para uma economia de baixo carbono é uma necessidade, a questão que se levanta é exatamente como isso pode ser realizado.

Entre maio e setembro de 2023, o BNDES promoveu seis encontros para discutir a descarbonização da indústria de base em colaboração com as entidades representativas[5] das indústrias de cimento, fertilizantes, siderurgia, química, mineração e base florestal.

Ao longo do ciclo de seminários, foram abordadas as oportunidades de rotas de descarbonização e os desafios relacionados ao atingimento das metas de redução das emissões de carbono estabelecidas no Acordo de Paris.

Este texto foi elaborado com base no material apresentado pelas entidades representativas e empresas participantes e está organizado em quatro seções. A primeira seção aborda a análise do cenário no qual a indústria de base se insere no contexto da descarbonização da economia, com suas contribuições na transição para uma economia de baixo carbono e estratégias transversais de descarbonização. A segunda seção fornece detalhes sobre os processos e produtos que geram maior emissão de GEEs, as rotas tecnológicas específicas para descarbonização em cada setor, assim como os desafios à obtenção dos investimentos necessários para sua concretização. A terceira seção destaca o apoio contínuo do BNDES à indústria de base ao longo dos anos e sua perspectiva para fomentar uma transição justa para uma economia de baixo carbono, marcando uma nova etapa do desenvolvimento industrial brasileiro. A última seção é destinada às considerações finais.

O fortalecimento da indústria brasileira, considerando um cenário de transição justa para uma economia de baixo carbono, visando a redução das desigualdades, assim como a segurança alimentar, hídrica e energética, é um eixo prioritário da estratégia do BNDES. Esta publicação busca contribuir para um entendimento mais aprofundado acerca de soluções possíveis, facilitando a discussão e a implementação de ações direcionadas para promoção de indústrias de base de baixo ou zero carbono no Brasil.

---

4 No original: *"Industry is at the core of developing low-carbon solutions: it is responsible for producing technologies such as renewable electricity generation facilities, clean vehicles, and energy-efficient buildings. Therefore, it is imperative to reduce emissions from industrial operations while industry continues to supply transformational technologies and infrastructure. These approaches should be compatible with a pathway to zero industrial emissions"*.

5 Snic, ABCP, Anda, Sinprifert, AMA Brasil, IABr, ABM, Abal, Abiquim, IBÁ e Ibram.

TRANSIÇÃO PARA ECONOMIA DE BAIXO CARBONO: O PAPEL DA INDÚSTRIA

Com exceção das indústrias de base florestal e de mineração,[6] os demais setores da indústria de base – siderurgia, cimento, químicos e fertilizantes – são considerados de particular dificuldade no abatimento de emissões de GEEs (*hard-to-abate*) devido à natureza de suas operações intensivas em carbono e energia. A descarbonização dessas indústrias demanda soluções tanto de infraestrutura e energia quanto na própria indústria, como discutido na introdução.

No caso das indústrias *hard-to-abate*, alguns processos de produção são particularmente críticos: a fabricação de cimento requer a calcinação de calcário em fornos a altas temperaturas, liberando CO_2 como resultado da decomposição química do carbonato de cálcio; a produção de aço envolve o processo de redução de minério de ferro em altos-fornos, o que consome grandes volumes de carvão metalúrgico e gera emissões substanciais de CO_2 como parte do processo; na indústria química, diversos processos, como a produção de amônia, etileno e metanol, liberam CO_2 como subproduto ou parte do processo de síntese, o que se aplica também à indústria de fertilizantes.

As indústrias de mineração e de base florestal, por sua vez, não são tratadas como de difícil abatimento, pois suas emissões de processo são menos representativas, com o problema se concentrando em sua demanda energética.

Além das dificuldades técnicas da transição para fontes de energia mais limpas e processos de produção de baixo carbono,[7] os setores *hard-to-abate* ainda enfrentam fatores econômicos igualmente desafiadores. A demanda por investimentos substanciais em infraestrutura, tecnologias inovadoras e mudanças operacionais pode ser economicamente custosa e requerer um período de transição prolongado. São potencialmente agravantes: um ambiente com baixas margens de lucro, a intensidade de capital, a longa vida útil dos ativos e a forte concorrência comercial de importados,[8] que não necessariamente estão sujeitos às mesmas preocupações com a pegada de carbono.

---

6 No caso da mineração, conforme será detalhado na seção 2.3, o desafio da descarbonização encontra-se no escopo 3, justamente por conta dos processos metalúrgicos e de refino da etapa de transformação.

7 Substitutos viáveis para processos que exigem altos níveis de temperatura, pressão ou eletricidade, que sejam igualmente eficientes em termos de custos e desempenho, são muitas vezes difíceis de encontrar.

8 O setor de cimento é uma exceção quanto à concorrência com produtos importados de maiores emissões de GEEs, por se tratar de um mercado majoritariamente doméstico.

> A escala de produção das EIIs [indústrias intensivas em energias (EEI, de *energy intensive industries*)] tem aumentado constantemente ao longo dos últimos 100 anos, com altos custos afundados em ativos atuais, como altos-fornos, fornos, craqueadores e a infraestrutura associada. As EIIs operam continuamente e por longos períodos, com grandes reinvestimentos e renovações feitos apenas a cada 15 a 25 anos (Wesseling *et al.*, 2017). As janelas de oportunidade para realizar mudanças técnicas significativas e investir em novas tecnologias de processos com baixa pegada de carbono se apresentam raramente (Åhman, 2020, p. 2, tradução nossa).[9]

Ao mesmo tempo que a indústria de base tem um grande desafio para reduzir emissões, seus produtos são essenciais à transição climática, contribuindo com novos materiais necessários à transformação e à adaptação para alcançar a neutralidade de carbono. Para que a transição climática ocorra, faz-se necessária a colaboração de toda a economia com a coordenação entre diferentes setores, a mobilização de recursos e o uso complementar de instrumentos públicos e privados.

A discussão sobre o cenário no qual a indústria de base se insere no contexto da descarbonização da economia foi dividida em três subseções. Na primeira, são apresentados os principais cenários climáticos para a economia brasileira e como os instrumentos de política podem apoiar a descarbonização. Na segunda, esses cenários são abordados no contexto da indústria de base, indicando as contribuições dessa indústria para uma economia de baixo carbono. A última subseção aborda as estratégias transversais de descarbonização, aplicáveis a diversos setores.

Cenários climáticos para o Brasil e políticas para descarbonização

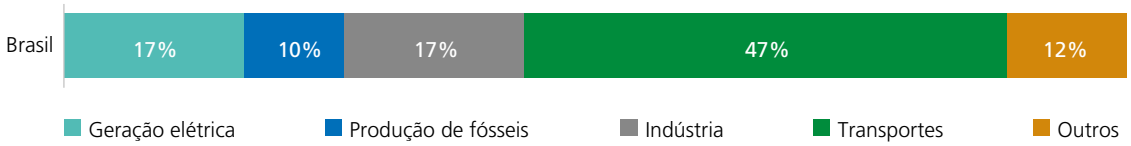
As especificidades da economia brasileira em termos de perfil produtivo e de emissões são elementos-chave para desenhar uma estratégia de descarbonização. Conforme exposto na Introdução, os dados de 2022 do perfil de emissões brutas do Brasil mostram sua concentração nos setores de mudança de uso da terra e florestas (48%) e de agropecuária (27%), seguidos por energia (18%, sendo o componente de uso industrial de 3% das emissões totais brasileiras e, 17% do componente energia), resíduos (4%) e processos industriais (3%) (Seeg, 2023). Esse perfil diverge das emissões mundiais, nas quais o maior componente é o

9 No original: "*The production scale of EIIs has steadily increased over the past 100 years, with huge sunk costs in current assets such as blast furnaces, kilns, crackers, and the associated infrastructure. EIIs operate continuously and for longer periods, with major reinvestment and refurbishment only done every 15 to 25 years (Wesseling et al., 2017). The windows of opportunity to make major technical changes and invest in new low-carbon process technologies present themselves infrequently*".

setor de energia (75% em 2021), de acordo com a Climate Analysis Indicators Tool (CAIT).[10] A comparação entre os dados revela desafios específicos, mas importante vantagem competitiva: a matriz energética mais limpa do Brasil é um diferencial.

Há importantes desafios para a descarbonização da economia brasileira, incluindo indústria e energia. A distribuição das emissões relacionadas ao uso de energia no Brasil é apresentada no Gráfico 3, indicando o importante peso do consumo dos setores industrial e de transportes. Vale destacar que, em transportes, considera-se tanto transporte urbano como atividades logísticas da indústria.

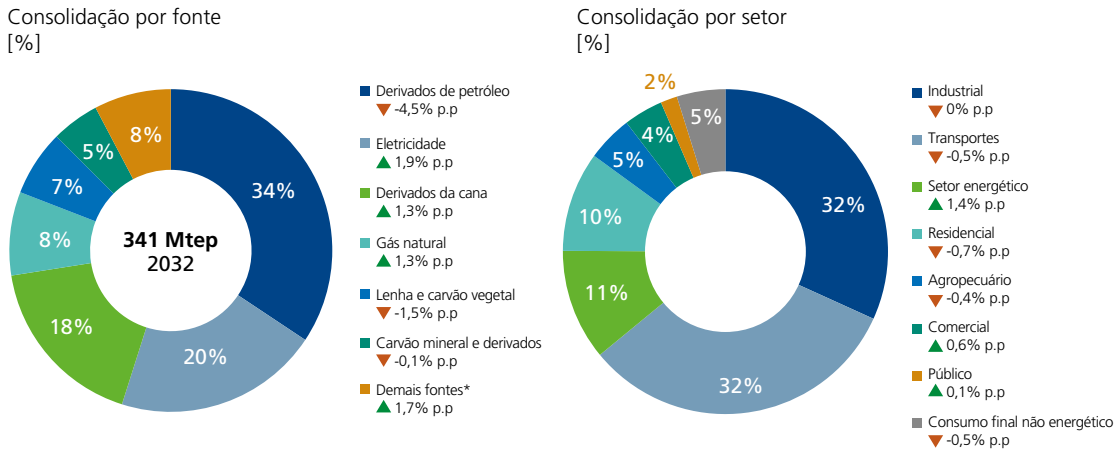
GRÁFICO 3. Participação das emissões absolutas de GEEs por uso da energia – Brasil (2021)



Fonte: Adaptado de Centro Brasileiro de Relações Internacionais e outros (2021).

Esse perfil pode se alterar a depender da tendência da demanda por energia, relacionada ao crescimento econômico e populacional. Estudo da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) indica crescimento anual médio de 2,4% para o consumo de energia até 2032 (EPE, 2023b). Os cenários indicam que derivados de petróleo perdem participação no consumo, mas continuam a ser a fonte mais representativa (Gráfico 4).

GRÁFICO 4. Consumo de energia por fonte e setor – 2032



Fonte: Adaptado de EPE (2023b).
Nota: A legenda apresenta a variação da participação em pontos percentuais entre 2022 e 2032.

10 Disponível em: https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions. Acesso em: 2 fev. 2024.

Nesse contexto, cenários internacionais enfatizam a importância de agendas como aumento de eficiência energética, ampliação da geração de energias renováveis e desenvolvimento de novas tecnologias para a descarbonização do setor de energia (IEA, 2023). Vale destacar que essa é uma agenda do setor produtor de energia, mas também do setor consumidor, incluindo indústrias intensivas em energia, como as indústrias de base.

Buscando uma análise de longo prazo para o Brasil, destacam-se os cenários de neutralidade de emissões do estudo realizado pelo Centro Brasileiro de Relações Internacionais (Cebri) e colaboradores (2023).

Os cenários de descarbonização são usados para explorar diferentes opções de mitigação de emissões para alcançar determinado resultado climático, que se relaciona a metas de limite de aumento de temperatura. Foram elaborados três cenários distintos que convergem para emissões líquidas nulas de GEEs no país no horizonte de 2050, intitulados: (i) transição brasileira (TB); (ii) transição alternativa (TA); e (iii) transição global (TG).

Cenário de transição brasileira: moldado com base nos compromissos assumidos pelo país em sua Contribuição Nacionalmente Determinada (*nationally determined contribution* – NDC), busca indicar a trajetória ótima custo-eficiente (com base nos recursos, no conhecimento e nas expectativas de custos futuro) para o Brasil alcançar a neutralidade líquida em carbono até 2050. Nesse cenário, o Brasil alcança a neutralidade independentemente das ambições e dos compromissos dos demais países, e volta a figurar entre as economias com grandes e interessantes oportunidades para alocação de capital.

Cenário de transição alternativa: busca testar uma trajetória tecnológica alternativa para o alcance da neutralidade em carbono no Brasil até 2050, considerando os impactos da própria mudança climática no setor energético e, principalmente, as incertezas do processo de difusão tecnológica. Trata-se de uma variação do cenário TB, na qual são impostas maiores restrições, de forma a limitar ou induzir a escolha de rotas tecnológicas pelas quais o processo de transição tomará forma.

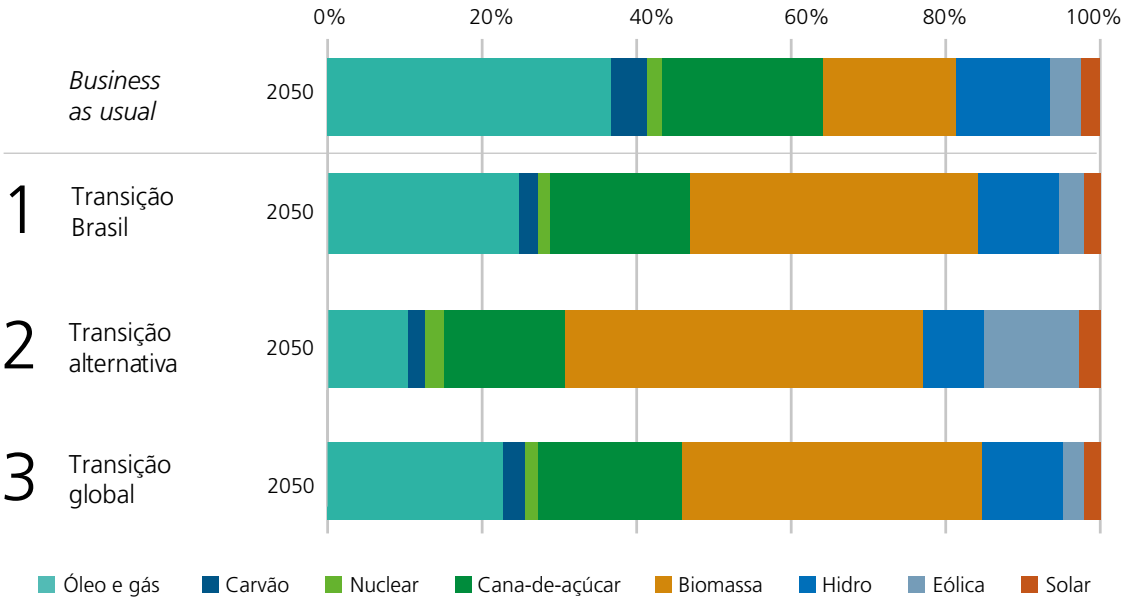
Cenário de transição global: busca destacar a contribuição do Brasil em um mundo que pretende limitar o aumento médio da temperatura superficial global em até 1,5°C até 2100, referente aos níveis pré-industriais. Dentro de um orçamento global de carbono de 400 $GtCO_2$, com base no mínimo custo global, o Brasil dispõe de orçamento de carbono de 13,2 $GtCO_2$ para realizar a descarbonização (Cebri *et al*., 2023).

Esses cenários consideram que a demanda de energia primária se elevará acima de 400 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep) até 2050, com um crescimento anual médio de 1,5%, taxa que corresponde a pouco mais da metade do verificado nos últimos trinta anos.

Como indicado no Gráfico 5, nos três cenários de neutralidade das emissões em 2050, também se estima a redução da utilização de combustíveis fósseis, em especial óleo e gás, e o aumento do uso de fontes renováveis a ponto de superarem a participação de 70%.

Nos três cenários, a fonte com maior ganho de participação na matriz energética brasileira será a biomassa, seguida por eólica e solar (Cebri *et al.*, 2021).

GRÁFICO 5. Cenários de energia primária por fonte – 2050



Fonte: Adaptado de Cebri e outros (2023).

A política pública tem papel central para a materialização dos diferentes cenários. No documento *Diretrizes para uma estratégia nacional para neutralidade climática*, o Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima – MMA (Brasil, [2022]) registra medidas para o setor de energia, na perspectiva de alcançar 45% a 50% de participação de energias renováveis na composição da matriz energética em 2030, incluindo alguns rebatimentos em cadeias industriais como os que destacamos a seguir:

- **i.** expandir a participação e o consumo de biocombustíveis por meio do RenovaBio;
- **ii.** incentivar a fabricação e o uso de veículos elétricos e híbridos elétricos (inclusive de carga);
- **iii.** promover ganhos de eficiência no setor energético e elétrico;
- **iv.** fomentar o aproveitamento energético de resíduos, inclusive resíduos sólidos urbanos; e
- **v.** tecnologias de captura e armazenagem de CO_2, para a redução da pegada de carbono nos setores de óleo e gás e de biocombustíveis;

Em 2023, o Governo Federal levou a questão climática para o centro da agenda econômica com o lançamento do Plano de Transformação Ecológica e da nova política industrial, que conta com um espaço específico para a discussão da descarbonização da indústria. Essas e outras estratégias nacionais buscam alinhar-se com as melhores práticas globais de políticas de transição climática.

Desde sua adesão ao programa Partnership for Market Readiness, criado pelo Banco Mundial em 2010, o Brasil já discutia a implantação de um sistema de comércio de emissões de GEEs, no modelo *cap and trade*. O programa tinha o intuito de fomentar a criação de mercados regulados de carbono em países em desenvolvimento. Projetos de lei que discutem o tema já são apresentados há alguns anos ao Congresso Nacional brasileiro.

Em 2023, o governo brasileiro defendeu a criação de um mercado regulado de carbono. Nesse sentido, houve discussão no Senado Federal, com aprovação do PL 412/2022 na Comissão de Meio Ambiente (CMA) em outubro de 2023. O projeto foi apensado ao PL 2.148/2015, que, por sua vez, estava em tramitação e foi aprovado na Câmara dos Deputados em dezembro do mesmo ano. Com essa aprovação, o PL voltou ao Senado (sob o número de PL 182/2024) e está em vias de ser votado. Caso aprovado com mudança, retornará para avaliação da Câmara.[11]

Caso instituído o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões, o Brasil terá mais um instrumento em sua política climática para intensificar a descarbonização e atingir a NDC brasileira. Essa iniciativa segue a tendência internacional de coordenar instrumentos de investimento com instrumentos de precificação de carbono, de modo a computar a externalidade negativa das emissões de GEEs nos custos relativos da economia, acelerando a migração para soluções verdes (Nordhaus, 2015). Segundo Semmler e outros (2021), o uso de preço de carbono tem crescido de forma acelerada e se difundido globalmente, com destaque para a União Europeia, envolvendo também países em desenvolvimento. O Brasil segue essa tendência internacional, o que pode impactar as decisões de investimento no país.

De modo a evitar impactos negativos, a cartilha internacional indica que os governos devem reciclar as receitas advindas dos Sistemas Nacionais de Comércio de Emissões em investimentos complementares para acelerar a oferta de soluções verdes e diminuir impactos distributivos na população (Heine *et al*., 2019). Na União Europeia, por exemplo, o mercado de carbono financia um fundo denominado Just Transition Fund, que visa apoiar as regiões e comunidades mais afetadas pela transição para uma economia neutra em carbono.

Adicionalmente, a boa prática indica que a precificação de carbono apenas com uma ótica doméstica pode ser ineficiente, por induzir um comportamento de *free-rider*: países que não precificam carbono podem se beneficiar em uma concorrência ambientalmente predatória, mantendo atividades intensivas em emissões. Em setores altamente internacionalizados, soluções globais precisam ser desenhadas. A União Europeia recentemente anunciou o mecanismo de ajuste de fronteiras de carbono (*carbon border adjustment mechanism* – CBAM), impondo para as importações a mesma precificação de carbono do mercado doméstico. Nordhaus (2015) propõe uma visão mais ampla: a formação de clubes climáticos entre países, nos quais os países-membros se comprometam com um determinado preço de carbono,

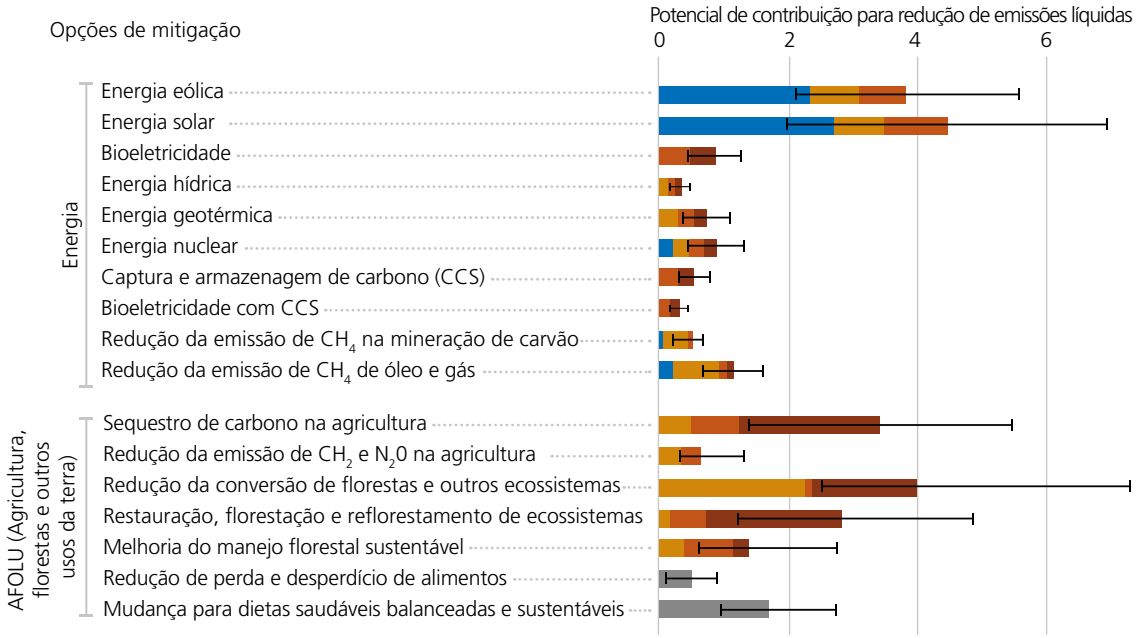
11 Para mais informações, ver: https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2023/12/26/senado-volta-a-debater-em-2024-regulamentacao-do-mercado-de-carbono. Acesso em: 8 jan. 2024.

impondo o mesmo custo para importações. Ao mesmo tempo, o Fundo Monetário Internacional (FMI) apresentou uma proposta de piso internacional de preço de carbono para todos os países beneficiários e membros do fundo (Parry; Black; Roaf, 2021).

Todavia, o preço de carbono não é capaz de induzir, sozinho, uma descarbonização se soluções viáveis com custo de investimento compatível não forem apresentadas. Os cenários mostram investimentos que já podem ser feitos no curto prazo (por exemplo, para incremento de eficiência energética e uso de biocombustíveis), mas há outros que ainda precisam de soluções tecnológicas em desenvolvimento e só conseguirão se efetivar mais tarde, caso não haja incentivos para isso.

O Gráfico 6, produzido pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC),[12] mostra uma lista de tecnologias-chave para a descarbonização e seu custo por tonelada de carbono reduzido. Para a indústria, investimentos em eficiência energética aparecem com melhor custo-benefício para abatimento enquanto há outras soluções em pauta, como novos combustíveis, eletrificação e captura de carbono, que ainda demandam desenvolvimento tecnológico e escala para reduzirem seu custo de abatimento.

GRÁFICO 6. Contribuição potencial para redução de emissões por tecnologia para a indústria – 2030 (GtCO2eq)



Fonte: Adaptado de IPCC (2023).

12 O IPCC é uma organização científico-política criada em 1988 no âmbito da Organização das Nações Unidas (ONU) pela iniciativa do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Pnuma) e da Organização Meteorológica Mundial (OMM). Tem como objetivo principal sintetizar e divulgar o conhecimento mais avançado sobre as mudanças climáticas.

Esse quadro reforça o entendimento da descarbonização na indústria em um contexto de concorrência global, no qual a política pública tem papel central. Como resultado, o mundo vivencia uma nova onda de políticas industriais, caracterizada por investimentos verdes, cujo caso mais emblemático é o Inflation Reduction Act (IRA) dos Estados Unidos da América (EUA). O plano contempla mais de US$ 350 bilhões de investimento para oferta de energia e tecnologias verdes, incluindo veículos elétricos, hidrogênio verde, captura de carbono, eólica *offshore*, entre outras soluções. Esse movimento foi seguido pela União Europeia com a implantação de seu Green Deal, com € 250 bilhões em investimentos em tecnologias verdes. Em janeiro de 2024, o Governo Federal lançou a Nova Indústria Brasil (NIB) e, para organizar o financiamento dessa nova política industrial, o Plano Mais Produção, que prevê R$ 300 bilhões em recursos financeiros até 2026. Geridos pelo BNDES, pela Financiadora de Estudos e Projetos (Finep) e pela Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (Embrapii), os recursos serão disponibilizados por meio de linhas específicas – não reembolsáveis ou reembolsáveis – e mercado de capitais, em alinhamento com os objetivos e as prioridades das missões para promoção da neoindustrialização nacional.

A integração da precificação de carbono com mecanismos de incentivo ao investimento verde é um dos possíveis instrumentos de mercado na estruturação de novas cadeias produtivas e no reposicionamento de indústrias intensivas em carbono. No contexto atual, em que o Brasil passa a implementar tais políticas enquanto sofre ameaças resultantes da aplicação desses incentivos no exterior, o detalhamento da descarbonização das indústrias de base apresentado neste texto contribui para a discussão e formulação de políticas públicas. Na próxima subseção, alguns rebatimentos para essas indústrias são apresentados.

Contribuições das indústrias de base na transição para economia de baixo carbono

As indústrias de base são essenciais à transição climática, pois desenvolvem novos materiais para a transformação e a adaptação climática necessárias para alcançar a neutralidade de carbono. Tais materiais são imprescindíveis, por exemplo, para a construção de edificações resilientes e com baixa pegada de carbono, para o desenvolvimento de infraestruturas de energia renovável e para a eletrificação. Além disso, a descarbonização das indústrias de base é fator-chave para a descarbonização de outros setores, ao permitir que clientes e fornecedores reduzam significativamente suas emissões de GEEs de escopo 3.[13]

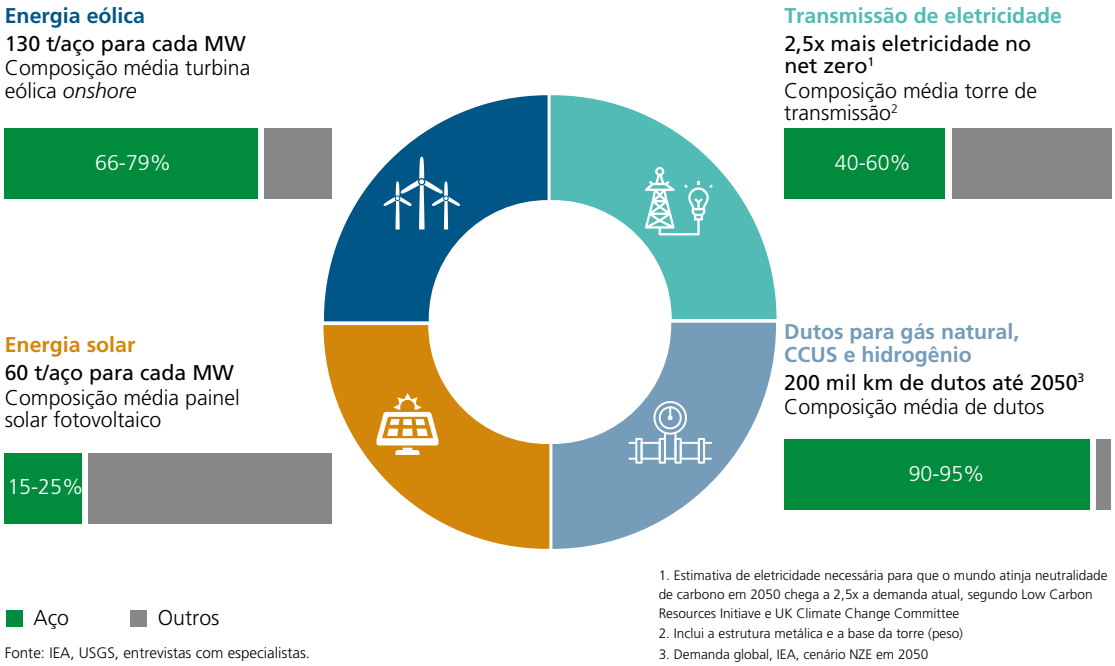
Na **indústria siderúrgica**, antecipa-se uma preferência e uma demanda crescentes por produtos leves e resistentes que contribuam para a redução do consumo de materiais, resultando na consequente diminuição das emissões de carbono associadas ao transporte e

13 Emissões geradas por clientes e fornecedores, exceto o fornecimento de energia, que é definido como escopo 2.

à fabricação. A relevância do aço leve e resistente é notável tanto para a construção civil quanto para a otimização da eficácia de veículos elétricos. No âmbito da mobilidade, a demanda será proveniente tanto dos veículos elétricos quanto das infraestruturas associadas à eletrificação, como as estações de carregamento.

No **setor de energia**, a contribuição do aço está na infraestrutura de energia renovável, como turbinas eólicas e estruturas de suporte para painéis solares, composição das torres de transmissão elétrica e dutos para transporte de combustíveis e gases. O desenvolvimento de ligas de aço específicas para essas aplicações pode contribuir para a eficiência e durabilidade dessas tecnologias.

FIGURA 1. Contribuição da indústria siderúrgica para a transição



Fonte: Adaptado de apresentação realizada pelo Instituto Aço Brasil em 11.7.23 no Seminário de Descarbonização da Indústria Siderúrgica no BNDES.

Em relação à **indústria de cimento**, o desenvolvimento de novos produtos desempenha importante papel na construção de estruturas resilientes às mudanças climáticas, promovendo segurança e sustentabilidade a longo prazo. Nesse cenário, cresce a demanda por produtos de alto desempenho e durabilidade que garantam a resistência das estruturas a condições adversas, como ventos fortes, tempestades, inundações e outros eventos climáticos extremos. Logo, características como a permeabilidade, a resistência à corrosão causada por águas salgadas e substâncias químicas, a rápida secagem, além da capacidade de atuar como isolante térmico, serão de extrema importância. Tais propriedades não apenas fortalecem a resiliência estrutural, como também contribuem para a eficiência energética, a rápida reconstrução e a adaptação a variáveis climáticas desafiadoras.

A **indústria de fertilizantes** pode contribuir para a descarbonização, dado que a nutrição de plantas aumenta a produtividade agrícola e recupera solos degradados, gerando um efeito "poupa-terra", com aumento da produção agrícola sem expansão de área desmatada. Além disso, essa indústria tem se apresentado como importante consumidora de resíduos orgânicos transformados em bioinsumos, caso dos fertilizantes organominerais.

A **indústria de mineração** provê fertilizantes essenciais para a produtividade agrícola – fosfato, potássio e remineralizadores –, além de minérios como lítio, cobre, níquel, grafite, alumínio, terras raras, zinco, vanádio, urânio, entre outros, que são aplicados na geração de energias renováveis e na produção de veículos elétricos. Esses minerais são considerados estratégicos ou críticos por diversos países e instituições, por apresentarem reservas consideradas não abundantes diante do crescimento projetado da demanda, ou concentradas em países sujeitos a intervenções de ordem geopolítica, potencialmente causadoras de rupturas de fornecimento.

A **indústria química** conta com diversas iniciativas promissoras em relação à transição para uma economia de baixo carbono. Inicialmente, pela relativa facilidade técnica de implementação, a substituição de matérias-primas mais poluentes, como o carvão mineral e a nafta, pelo gás natural pode representar um passo significativo na transição, devido a sua maior eficiência energética e à redução de emissões de CO_2.[14] Em um estágio posterior, o uso do hidrogênio de baixo ou zero carbono na produção de químicos como a amônia, essencial para a fabricação de fertilizantes, e o metanol, para a fabricação de biodiesel, tem o potencial de reduzir a pegada de carbono global de setores industriais importantes, como agricultura e transporte, que dependem desses químicos para suas operações. Outra iniciativa promissora é a utilização de catalisadores aprimorados para aumentar a eficiência dos processos e reduzir o gasto energético e as perdas. Cumpre ainda citar novas rotas, como a produção de químicos a partir da biomassa, a exemplo de plásticos renováveis, e a reciclagem química, que representa uma abordagem inovadora na gestão de resíduos plásticos, possibilitando a decomposição desses materiais em monômeros ou compostos reutilizáveis. Essa estratégia não apenas fomenta a reutilização de materiais, como também reduz a necessidade de recursos virgens.

A **indústria de base florestal** no Brasil, importante produtor de biomassa, é um pilar na construção da bioeconomia. O país se destaca por sua competitividade, alcançando um incremento médio anual (IMA) de 41 m³ por hectare/ano em termos de produtividade, bastante superior ao dos demais países produtores (Vidal; Hora, 2011). Essa biomassa pode ser aproveitada de diversas maneiras na descarbonização da economia, incluindo: a geração de energia com a produção de combustíveis à base de lignina; a substituição de matérias-primas à base de carbono fóssil com a fabricação de plásticos de celulose; e a fabricação de

14 A queima do gás natural emite menos dióxido de carbono por unidade de energia gerada, contribuindo, assim, para a redução das emissões totais de carbono na atmosfera.

materiais de construção. Além de todos esses benefícios, é importante ressaltar o significativo sequestro e armazenamento de carbono proporcionado pela indústria ao substituir áreas degradadas por florestas cultivadas.

Tecnologias transversais

Como mencionado anteriormente, apesar dos desafios técnicos e econômicos associados à descarbonização, a indústria de base tem a capacidade e a oportunidade de reduzir suas emissões de GEEs por meio de medidas de mitigação.[15] Nesse percurso de transição, a indústria ainda deve desempenhar um papel crucial ao proporcionar novos materiais essenciais para uma economia de baixo carbono.

Nesta subseção, destacamos quatro estratégias de descarbonização transversais a diversos setores da economia: (i) eficiência energética; (ii) eletrificação; (iii) substituição por matérias-primas, combustíveis e fontes de energia com baixo teor de carbono; (iv) captura de carbono combinada com uso ou armazenamento subterrâneo. As discussões sobre essas medidas permearam todos os seis seminários dedicados à descarbonização da indústria de base.

A estratégia transversal mais enfatizada entre os representantes da indústria presentes no ciclo de seminários foi a adoção de medidas de eficiência energética. Otimizar o consumo de energia do setor industrial reduz diretamente as emissões de GEEs associadas à queima de combustíveis fósseis e proporciona retornos financeiros imediatos, tornando-se uma estratégia ganha-ganha.

Até 2031, espera-se que os ganhos com eficiência energética de todos os setores da economia representem redução de até 8% do consumo final energético do Brasil. Na indústria, o ganho com o uso eficiente de energia representará aproximadamente 5% da demanda de energia final prevista para 2031. Já os ganhos de eficiência elétrica representarão 3%, equivalentes ao consumo atual das indústrias têxtil e cerâmica (10 TWh) (EPE, 2023a).

O Gráfico 6, já apresentado, destaca a possível contribuição, por tecnologia, para a redução de emissões na indústria até 2030 (GtCO2eq), evidenciando que os investimentos em eficiência energética são os mais vantajosos em termos de custo-benefício para a redução de emissões. No entanto, para alcançar reduções mais significativas nas emissões industriais, é necessário transcender o foco em melhorias incrementais, ainda que importantes, como no caso da eficiência energética, e buscar mudanças transformacionais.

15 Na indústria, as medidas de mitigação geralmente atuam sobre um ou mais dos seguintes eixos: i. Operacionais: envolvem alterações nos processos de operação de uma instalação industrial. ii. Relativos a equipamentos: implicam a substituição de dispositivos em uma unidade industrial. iii. Relativos a combustíveis: requerem ajustes em uma planta industrial para adotar fontes de combustíveis alternativas.

As demais medidas – eletrificação, substituição de matérias-primas e combustíveis e captura de carbono – ainda requerem avanços tecnológicos e escalabilidade para diminuir seus custos de mitigação. No entanto, elas são alternativas promissoras em médio e longo prazo para descarbonizar a produção industrial. Detalhamos cada uma delas a seguir:

i. Eletrificação direta de processos industriais, em particular para geração de calor em alta temperatura.

> À medida que a indústria fizer a transição de combustíveis fósseis para energia elétrica, será capaz de aproveitar melhor os avanços na eletricidade com baixa pegada de carbono, tanto da rede elétrica quanto de fontes de geração locais. No caso da eletricidade adquirida da rede, essa estratégia se baseia na suposição de avanços paralelos feitos no setor de energia elétrica para aumentar o uso de fontes de baixo carbono. No Brasil, essa já é uma realidade evidente, uma vez que mais de 88% (EPE, 2023a) da matriz elétrica é proveniente de fontes renováveis.

ii. A substituição por matérias-primas, combustíveis e fontes de energia com baixo teor de carbono pode reduzir ainda mais as emissões de GEEs associadas à combustão em processos industriais.

> Uso de hidrogênio como fonte de calor ou agente de redução, no caso de produção de aço e produtos químicos, com hidrogênio de carbono zero, obtido pela eletrólise, ou hidrogênio de carbono quase zero, derivado da reforma do metano a vapor com captura de carbono.[16]

> Utilização de biomassa como fonte de energia para calor em diversas indústrias, com destaque para as de base florestal, e como agente redutor ou matéria-prima na produção siderúrgica, especialmente para produção de plásticos.

iii. Captura de carbono combinada com uso ou armazenamento subterrâneo (*carbon capture and utilization or storage* – CCUS).

> Entre as opções inovadoras e em ascensão, a captura e utilização ou armazenamento de carbono se destaca como uma das principais soluções tecnológicas com potencial de implementação em grandes fontes de emissões, principalmente nas de difícil mitigação. A estratégia de CCUS envolve a captura do CO_2 gerado antes que ele possa ser liberado na atmosfera, sua utilização, sempre que possível, e seu armazenamento a longo prazo, quando não utilizado.

16 Para mais detalhes sobre o desenvolvimento e uso do hidrogênio como energético, bem como reflexões sobre as oportunidades existentes no Brasil, ver BNDES (2022).

A seleção de um ou mais desses caminhos será definida por condições locais específicas, incluindo a disponibilidade de recursos naturais, a infraestrutura existente, as regulamentações locais, os custos e a viabilidade econômica.

No entanto, os desafios distintos enfrentados por cada setor das indústrias *hard-to-abate* serão o principal fator considerado para a escolha da abordagem, uma vez que suas particularidades influenciam a rota adotada e o ritmo adequado de seus processos de descarbonização.

Na próxima seção, as tecnologias transversais continuam presentes, porém a ênfase se desloca para as estratégias específicas dos diferentes setores da indústria de base. Assim, veremos os caminhos apresentados pelos setores de cimento, aço, mineração, química, fertilizantes e base florestal durante o Seminário de Descarbonização das Indústrias de Base.

ROTAS PARA A DESCARBONIZAÇÃO POR SETOR

Nesta seção, examinaremos os cenários prospectivos conforme apresentados pelos setores de cimento, aço, mineração, química, fertilizantes e base florestal durante o de Seminário de Descarbonização das Indústrias de Base. Cada um desses setores apresenta processos distintos, demandas energéticas específicas, disponibilidade variada de recursos e tecnologias únicas, o que torna necessária a busca por soluções personalizadas.

Tais soluções podem ser tanto medidas que envolvem pequenas modificações nos processos de produção, normalmente resultado de inovações incrementais, quanto alterações substanciais na estrutura de uma instalação industrial para incorporar um procedimento significativamente distinto do convencional, resultando em um novo processo. Novos processos derivam de grandes saltos de inovação tecnológica.

Adicionalmente, devemos considerar os aspectos geográficos, regulatórios e econômicos, que desempenharão um papel fundamental na definição das estratégias de descarbonização.

Por meio dessa análise, buscamos compreender como as indústrias *hard-to-abate* estão se preparando para enfrentar os desafios da sustentabilidade e contribuir de forma significativa para um futuro de baixo carbono.

Indústria de cimento

A indústria de cimento é um segmento da indústria de base que engloba o processo de produção e comercialização desse material. O cimento é um agente ligante que, combinado com agregados como areia, brita e água, forma o concreto. O concreto é o segundo material mais usado globalmente, após a água.

Devido a sua força, versatilidade e disponibilidade, concreto e cimento são importantes pilares da indústria de construção e infraestrutura. Esses materiais oferecem alta resistência à compressão e durabilidade, tornando-os ideais para estruturas robustas, como edifícios, pontes e estradas. Sua capacidade de serem moldados em várias formas e tamanhos, juntamente com sua acessibilidade, contribui para seu amplo uso em projetos diversificados.

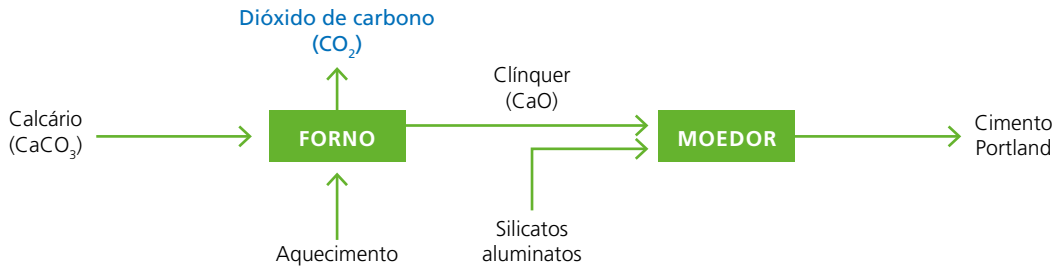
Principais processos emissores

A fabricação de cimento libera CO_2 por meio de duas atividades principais: as reações de calcinação e o uso de energia. Emissões relacionadas à energia ocorrem quando combustíveis térmicos, mais comumente o coque de petróleo, são usados para aquecer um pré-calcinador e um forno rotativo. A outra fonte primária de emissões diretas de CO_2 (emissões

de processo) vem da produção do clínquer, um produto intermediário que é o principal componente do cimento. A reação química ocorre no pré-calcinador, no qual o calcário ($CaCO_3$) é decomposto em cal (CaO) e CO_2. O CO_2 é liberado para a atmosfera, enquanto a cal reage com a sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e o óxido de ferro (Fe_2O_3), formando o clínquer (Rissman *et al*., 2020).

Na Figura 2, consta o processo simplificado da produção de cimento.

FIGURA 2. Processo de produção do cimento



Fonte: Adaptado de Gross (2021).

Em escala mundial, aproximadamente 90% das emissões de CO_2 oriundas da fabricação de cimento ocorrem durante a produção de clínquer,[17] seja na calcinação da matéria-prima, seja com a queima de combustíveis no interior do forno. A parcela restante resulta do transporte de matérias-primas e das emissões pelo consumo de energia elétrica na fábrica.[18]

A indústria de cimento é responsável por cerca de 20% a 27% das emissões industriais de GEEs e por 6% das emissões totais globais (Rissman *et al*., 2020; Unece, 2022). No Brasil, de acordo com dados do Seeg referentes a 2022,[19] a indústria de cimento foi responsável por 23,5% das emissões industriais de GEEs e por 1,5% do total das emissões do país. A emissão específica é de 564 kg de CO_2 por tonelada de cimento produzido (Visedo; Pecchio, 2019). Segundo a IEA,[20] a média mundial de emissão específica vem se mantendo constante desde 2018: 580 kg CO_2/t de cimento. Para atingir o cenário de emissões líquidas zero,[21] a indústria de cimento deve diminuir suas emissões a uma taxa anual de 3 a 4%, para alcançar uma emissão específica de 450 kg CO_2/t em 2030 e de 375 kg CO_2/t em 2050.

17 Decompondo as emissões da produção do cimento, temos 50% advindas da matéria-prima, 40% de combustíveis, 5% de transporte e 5% de consumo elétrico.

18 Dados da apresentação realizada pelo Snic em 25.5.23 no Seminário de Descarbonização da Indústria de Cimento no BNDES.

19 Disponível em: https://seeg.eco.br/dados/. Acesso em: 23 ago. 2023.

20 Disponível em: https://www.iea.org/energy-system/industry/cement. Acesso em: 9 set. 2023.

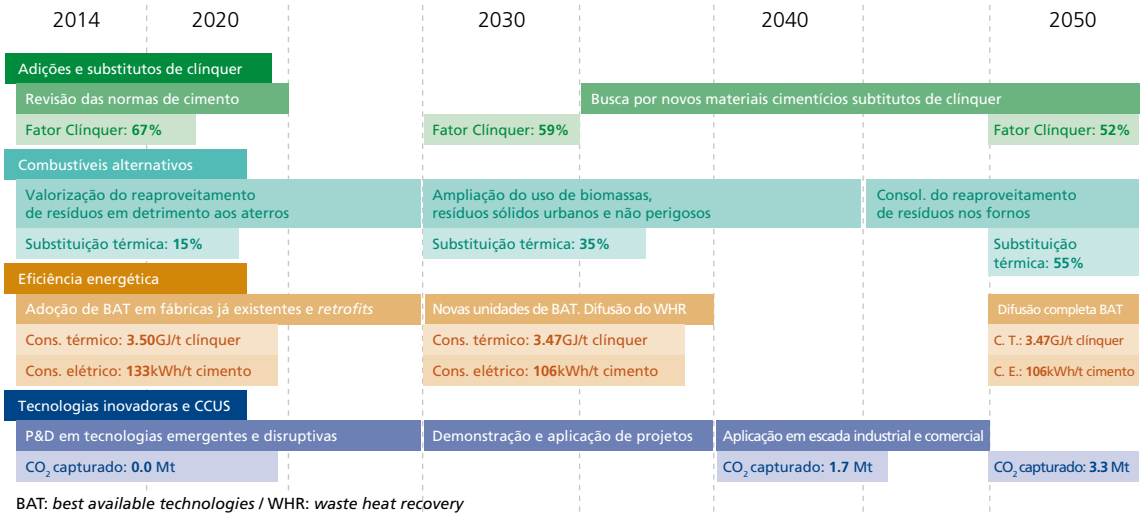
21 Alcançar emissões líquidas zero significa equilibrar as emissões de gases de efeito estufa liberadas com a remoção equivalente, resultando em um balanço líquido de zero emissões.

Rotas de descarbonização da indústria de cimento

Dado o forte impacto ambiental desta indústria, é fundamental selecionar estratégias de mitigação que possam contribuir para a produção sustentável de cimento. Segundo o estudo *Roadmap tecnológico do cimento* (Visedo; Pecchio, 2019), além das tecnologias inovadoras e CCUS, são três os principais pilares responsáveis pela redução das emissões do setor: (i) eficiência energética, mediante investimentos em linhas e equipamentos de menor consumo térmico e/ou elétrico; (ii) combustíveis alternativos, em substituição a combustíveis fósseis não renováveis; e (iii) adições e substitutos de clínquer, por meio do uso de subprodutos de outras atividades.

Para alcançar o cenário de emissões líquidas zero na produção de cimento, considerando o limite técnico e operacional de eliminar completamente as emissões de GEEs, é importante reconhecer a necessidade de tecnologias inovadoras, atualmente não disponíveis comercialmente, como a captura de carbono. Para garantir sua implementação em larga escala no menor período possível, é essencial investir em pesquisa e desenvolvimento.

FIGURA 3. Rotas para redução das emissões de CO_2 na indústria brasileira de cimento



BAT: *best available technologies* / WHR: *waste heat recovery*

Fonte: Adaptado de Visedo e Pecchio (2019).

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Ainda segundo o *Roadmap tecnológico do cimento* (Visedo; Pecchio, 2019), o parque industrial brasileiro é moderno e já atua de forma eficiente. Mudanças significativas na eficiência energética só devem ocorrer gradualmente a partir de 2030, com a substituição de unidades e equipamentos mais obsoletos pelas melhores tecnologias disponíveis. O consumo térmico na produção do clínquer, atualmente de 3,50 GJ/t, e o consumo elétrico na produção de cimento, de 113 kWh/t, podem alcançar valores de 3,22 GJ/t e 91 kWh/t até 2050, com uma redução acumulada de 38 Mt de CO_2.

Uma iniciativa de destaque é a utilização da recuperação de calor residual para a geração de energia elétrica, conhecida como *waste heat recovery system* (WHRS). Acredita-se que essa tecnologia possa ser implementada em aproximadamente 35% das instalações industriais brasileiras até 2030, com o potencial de reduzir o consumo de energia entre 20% e 30%.

No que diz respeito às medidas de eficiência energética, é importante observar que, devido à predominância de fontes de energia renovável na matriz elétrica brasileira, a parcela das emissões do setor proveniente do consumo elétrico é consideravelmente menor do que a média global (1% em comparação com os 5% globais). Dado o espaço limitado para melhorias, estima-se que as medidas de eficiência energética terão um impacto de aproximadamente 9% na redução das emissões acumuladas entre 2015 e 2050.

BOX 1. Casos de energia renovável

MIZU

A Cimentos Mizu apresentou um projeto de investimento em energia renovável que objetiva a descarbonização de sua cadeia produtiva. O Complexo Eólico Mundo Novo, localizado em São Miguel do Gostoso (RN), terá capacidade instalada de 103,5 MW e produzirá anualmente 490.000 MWh de energia elétrica a partir de maio de 2024. Esse empreendimento tem o potencial de reduzir 220.500 toneladas de CO2e por ano e de fornecer 100% da energia necessária para as nove fábricas em operação.

Por meio de Projeto de Recuperação Florestal, foram plantadas 25 mil mudas da mata nativa (caatinga) em terrenos antropizados e circunvizinhos ao parque eólico. A empresa ainda apresentou Plano de Recuperação de Área Degradada, que determina a realização de mais um plantio de 20 mil mudas até dezembro de 2023.

APODI

O projeto apresentado pela Cimento Apodi, também em eficiência energética, foi o WHRS. A Cimento Apodi é a única fábrica de cimento da América Latina a adotar esse sistema de geração de energia, que consiste na recuperação de calor residual proveniente do forno de clínquer para a produção de vapor.[22] São benefícios do WHRS:

- redução no consumo de energia elétrica: capacidade de gerar até 6 MW (25% a 30% de substituição do consumo elétrico da fábrica);
- redução de emissão de CO_2: possibilidade de deixar de comprar energia (termelétrica) que emite CO_2 em sua produção;
- estabilidade na rede elétrica e correção do fator de potência, o que melhora a eficiência no uso da energia elétrica.

22 A recuperação de calor residual proveniente do forno de clínquer para produção de vapor é realizada por meio do ciclo térmico de Rankine.

COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS

Os dados referentes a 2022, provenientes da IEA,[23] indicam que os combustíveis fósseis continuaram a ser a principal fonte de energia térmica para o setor em escala global, com uma participação de 90%. Em seguida, vieram a bioenergia e os resíduos renováveis (*renewable waste*) e não renováveis, com 4% cada. Para alcançar o cenário de emissões líquidas zero, faz-se necessário reduzir a parcela de combustíveis fósseis para 79% e de resíduos não renováveis para 3% até 2030, substituindo-os por combustíveis alternativos de baixo teor de carbono. Esse cenário também prevê que a participação da bioenergia e dos resíduos renováveis aumente para 16% e que a do hidrogênio passe de 0% para 2% da participação total de energia térmica.

O uso de combustíveis alternativos, por meio do coprocessamento de resíduos e da utilização de biomassas, é crescente no Brasil. Na indústria de cimento, o coprocessamento é a prática de fabricar cimento simultaneamente à incineração de resíduos industriais, agrícolas ou urbanos, em substituição a matérias-primas e combustíveis fósseis tradicionais. Os resíduos são reinseridos no ciclo produtivo, e o que não é convertido em energia como combustível alternativo é incorporado ao clínquer.

Os fornos de cimento apresentam características vantajosas para a incineração de resíduos, uma vez que permitem a completa destruição dos componentes orgânicos sem gerar cinzas. Essa abordagem oferece a oportunidade de gerar energia com emissões reduzidas de CO_2 e, ao mesmo tempo, mitigar o impacto ambiental associado ao descarte inadequado desses rejeitos na natureza.

A indústria brasileira de cimento logrou aumentar a participação dos combustíveis alternativos em sua matriz energética de 9%, em 2000, para 15% em 2014, chegando a 26% em 2020. A pretensão é chegar a 35% em 2030 e a 55% até 2050. Atualmente, cerca de 60% das fábricas integradas possuem fornos licenciados para coprocessar resíduos.

Embora restrições técnicas limitem a utilização de certos tipos de resíduos no processo de coprocessamento, existe uma ampla gama de materiais adequados para essa aplicação. Entre os insumos mais promissores, destacam-se os combustíveis derivados de resíduos (CDR), provenientes de resíduos não perigosos e resíduos sólidos urbanos (RSU).

De acordo com o *Roadmap tecnológico do cimento* (Visedo; Pecchio, 2019), a progressiva substituição por combustíveis alternativos nos fornos de cimento do Brasil desempenhará um papel significativo na redução das emissões da indústria, com a capacidade de mitigar aproximadamente 13% das emissões acumuladas até o ano de 2050.

23 Disponível em: https://www.iea.org/energy-system/industry/cement. Acesso em: 9 set. 2023.

BOX 2. Casos de combustíveis alternativos

Votorantim Cimentos

Em sua unidade de Salto de Pirapora (SP), a Votorantim Cimentos desenvolveu uma tecnologia que utiliza combustível derivado de resíduo sólido urbano (CDRSU) como alternativa parcial aos combustíveis fósseis tradicionalmente empregados. Essa tecnologia reduz a emissão de GEEs por tonelada produzida graças à diminuição da necessidade de extrair combustíveis de fontes não renováveis, assim como de transportá-los, como no caso do coque de petróleo. Além disso, a tecnologia ainda contribui para a redução do volume de resíduos urbanos enviado para aterros municipais, diminuindo os custos associados a essa destinação. Esse enfoque se alinha com o conceito de economia circular e promove a expansão dos processos de reciclagem.

A primeira fase do projeto, com investimento de cerca de R$ 30 milhões em sistemas de injeção e analisadores de gases, prevê uma redução do consumo de combustíveis fósseis em torno de 30% a 35%, levando em consideração todos os combustíveis alternativos disponíveis, como pneus, biomassas e resíduos. Além disso, a tecnologia permite o aproveitamento anual de cerca de 150 mil toneladas de CDRSU como fonte de energia térmica essencial para o processo de fabricação de cimento. Para a segunda fase do projeto, espera-se duplicar essa capacidade.

InterCement

O Projeto Biomassa, criado em 2017, teve início com um diagnóstico da disponibilidade de biomassas agrícolas, considerando as diversas vocações territoriais e o volume de parceiros. O objetivo era determinar a capacidade dessas biomassas de atender às necessidades de consumo de cada planta da InterCement. Esse diagnóstico se faz necessário para identificar quais tipos de matérias-primas orgânicas estão prontamente acessíveis e abundantes em uma área específica, permitindo o aproveitamento eficiente de recursos, reduzindo custos de transporte e promovendo uma nova fonte energética regional.

Foram realizadas visitas técnicas, coletas de amostras e testes industriais. Com o tempo, a necessidade de orientação para o negócio levou à contratação de consultoria, resultando na definição de planos de ação, parcerias e expansão para outros territórios. Atualmente, o projeto abarca sete grupos produtivos com 5.449 associados, próximos a três fábricas da InterCement. O projeto visa utilizar 15 mil toneladas anuais de biomassa, reduzindo 1,5 t de CO_2 por tonelada de biomassa acrescentada, ou seja, 22.500 toneladas anuais de CO_2.

ADIÇÕES E SUBSTITUTOS DE CLÍNQUER

Conforme já mencionado, a maior parte das emissões de CO_2 na fabricação de cimento decorre da produção de clínquer, seu principal produto intermediário.

A redução do consumo de clínquer por tonelada de cimento produzido pode se dar pela adição ou substituição parcial do produto por materiais como escória de alto-forno, cinzas volantes, argilas calcinadas e *filler* calcário. A adição[24] desses materiais na produção do cimento não apenas diversifica suas aplicações e características, como também promove a circularidade de subprodutos de outros processos, preservando recursos naturais não renováveis. Além disso, a adição ou a substituição do clínquer tem o potencial de reduzir tanto o consumo de combustíveis quanto as emissões de CO_2 decorrentes da calcinação, ao mesmo tempo que contribui para a conservação de recursos minerais.

De acordo com dados da IEA,[25] a média global da razão de clínquer para cimento aumentou de 0,66 para 0,71 no período de 2015 a 2022. No entanto, a métrica global não permite observar variações regionais significativas. A China, embora tenha uma das menores proporções de clínquer para cimento globalmente, viu sua proporção subir de 0,57 para 0,65 entre 2015 e 2022. Por outro lado, países com proporções mais altas, como os EUA e o Canadá, reduziram suas proporções de 0,90 e 0,87 em 2015, respectivamente, para 0,89 e 0,86 em 2022. Na indústria brasileira, segundo dados do Snic (Visedo; Pecchio, 2019), a razão de clínquer para cimento é de cerca de 0,67, posicionando o Brasil como o segundo país que mais utiliza adições no mundo.

Internacionalmente, a análise da IEA demonstra que, para se alinhar ao cenário de emissões líquidas zero, essa proporção deve diminuir para uma média global de 0,65 até 2030. No contexto brasileiro, conforme avaliação do Snic (Visedo; Pecchio, 2019), prevê-se que o volume de adições aumente, reduzindo a proporção de clínquer para 59% até 2030 e para 52% até 2050.

Para suportar o crescimento necessário das adições ao clínquer, o uso do *filler* calcário[26] como material adicionado ao processo de fabricação de cimento surge como uma das alternativas mais promissoras para mitigar as emissões de GEEs. A razão disso é que alguns dos materiais mais tradicionalmente usados como adições não estão universalmente disponíveis, sendo encontrados apenas nas proximidades de suas áreas de produção. Soma-se a isso a provável redução na disponibilidade, em função da evolução dos processos tecnológicos, de materiais como escória e cinzas volantes.

---

24 As adições ou substituições devem atender às especificações das Normas Técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

25 Disponível em: https://www.iea.org/energy-system/industry/cement. Acesso em: 9 set. 2023.

26 *Filler* calcário é a matéria-prima obtida por meio da moagem fina de calcário, basalto, materiais carbonáticos etc. Segundo o *Roadmap tecnológico do cimento* (Visedo; Pecchio, 2019), o uso do *filler* calcário não exige grandes investimentos e não requer calcinação, além de o material ser amplamente disponível para todas as fábricas que optarem por sua utilização.

Para alcançar essa meta global, entende-se que é necessário revisar normas, como códigos de construção em algumas regiões, direcionando o foco para o desempenho do concreto em vez de para requisitos prescritos com base na composição. Tudo isso deve ser feito levando em consideração condições regionais específicas e garantindo a manutenção de requisitos robustos de segurança.

BOX 3. Casos de adições e substitutos de clínquer

Ciplan

A Ciplan Cimento estabeleceu um processo de calcinação da argila, no qual argila calcinada pode substituir parcialmente o clínquer, com uma redução de 69% das emissões de CO_2. O investimento para a construção de um forno para a calcinação de argila é de aproximadamente US$ 100 a 120/t.

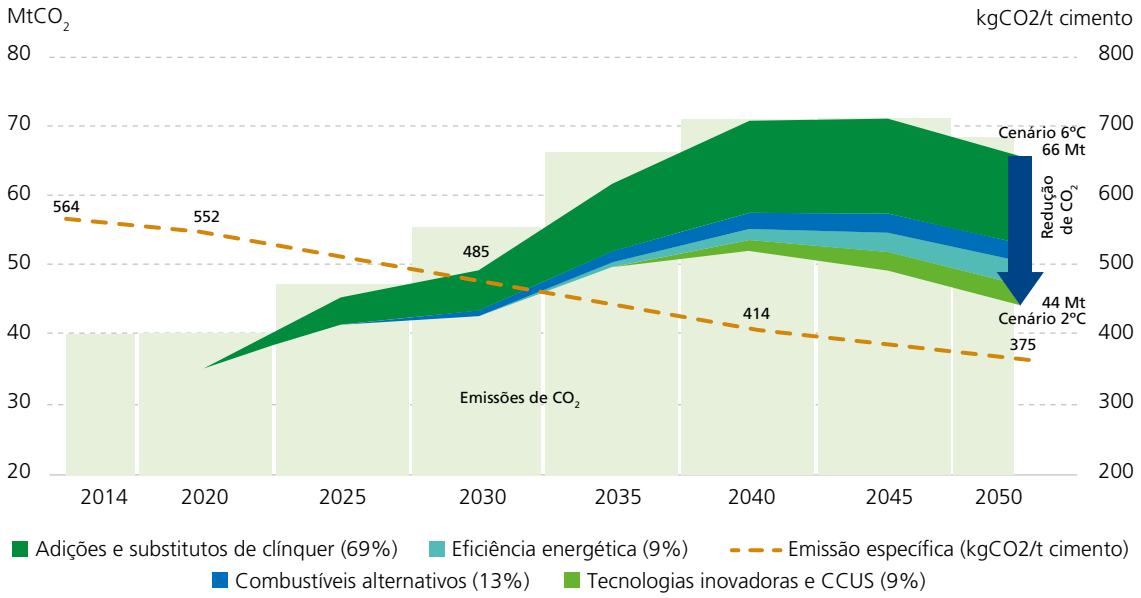
Cimento Nacional

O projeto de injeção de gás quente no moinho de cimento da unidade de Cantagalo da Cimento Nacional visa garantir a capacidade produtiva do moinho durante o período úmido, além de possibilitar o aumento do consumo de escória. A umidade média na entrada do moinho varia de 4% a 6% no período seco, e de 7% a 8% no período das chuvas. No entanto, a cada 1% de umidade acima da qual o moinho foi projetado para funcionar, perde-se até 10% de produtividade. Além disso, essa condição eleva o percentual de clínquer, em detrimento da escória. O projeto em questão tem como benefícios: o aumento da produtividade; a redução do fator clínquer; a redução de consumo elétrico; e melhorias operacionais.

No Brasil, conforme estimado pelo *Roadmap tecnológico do cimento* (Visedo; Pecchio, 2019), a redução da proporção de clínquer para cimento corresponde a aproximadamente 69% do potencial de redução das emissões acumuladas entre 2015 e 2050, destacando-se como o principal pilar na diminuição das emissões da indústria.

O Gráfico 7 resume a contribuição dos três pilares de descarbonização detalhados acima, que se somam a tecnologias inovadoras e CCUS partindo de uma análise de redução de 33% na intensidade carbônica entre 2019 e 2050.

GRÁFICO 7. Redução de emissões diretas de CO_2



Fonte: Visedo e Pecchio (2019).

Além do processo produtivo do cimento, há de se considerar o ciclo de vida do produto ao longo de sua cadeia de valor. Com isso em mente, o Snic anunciou a intenção de atualizar o *Roadmap tecnológico do cimento* de modo a abranger aspectos como a descarbonização do concreto, da construção, da recarbonatação, da eletrificação e as medidas de remoção e compensação de carbono para alcançar o *net zero*.

Indústria siderúrgica

O aço é base para uma ampla gama de setores industriais e para a construção civil. Sua adaptabilidade, durabilidade e resistência o tornam material essencial para a produção de estruturas, maquinários e veículos, por exemplo. Ainda que fundamental para a economia global moderna, sua produção é caracterizada pela alta intensidade energética e significativas emissões.

Segundo estudo da IEA (2020a), em 2019, o setor siderúrgico foi responsável por cerca de 8% do consumo global de energia (20% do consumo de energia industrial) e aproximadamente 7% das emissões totais.[27] Assim, a produção de uma tonelada de aço bruto

27 Emissões totais do setor energético, incluindo emissão de processo.

fabricado resulta, em média, na emissão direta de 1,4 tonelada de CO2e e na emissão indireta de 0,6 tonelada de CO2e.[28]

No Brasil, a produção de ferro e aço foi responsável por emissões de 46 milhões de toneladas de CO2e[29] em 2020, o equivalente a cerca de 2% do total de emissões do país.[30]

Principais processos emissores

A produção de aço ocorre por meio de dois principais processos: a rota integrada ou a rota semi-integrada. Os produtores de usinas integradas operam as três principais etapas do processo siderúrgico: redução, refino e laminação. Isso significa que, na rota integrada, o aço é produzido a partir da redução[31] do minério de ferro, principal fonte de insumo metálico nos altos-fornos (*blast furnace* – BF), tendo o carvão (mineral ou vegetal) como agente redutor. O resultado da redução é o ferro-gusa, que segue para refino em um conversor a oxigênio (*basic oxygen furnace* – BOF) para posterior laminação. Cabe ressaltar que o carvão vegetal somente é usado em altos-fornos de menor capacidade.

Os produtores de usinas semi-integradas operam em apenas duas etapas do processo siderúrgico: refino e laminação. Na rota semi-integrada, não há redução; os insumos metálicos são a sucata de aço, o ferro-gusa ou o ferro reduzido direto[32] (*direct reduced iron* – DRI) – adquiridos de terceiros –, usados para alimentar as aciarias elétricas, instalação industrial da qual o forno elétrico a arco (*electric arc furnace* – EAF) é o equipamento principal.

28 Em termos gerais, os valores divulgados pela IEA e pela World Steel (IEA, 2020b) são iguais quando ajustados para a forma como a geração de eletricidade é tratada. A IEA considera o consumo de eletricidade como energia final e atribui as emissões da geração de eletricidade como emissões indiretas, enquanto a World Steel o considera como energia primária e direciona essas emissões diretamente para a indústria siderúrgica. Para facilitar a comparação entre os setores da indústria de base que também são analisados pela IEA, neste texto usaremos os dados dessa instituição. Os grupos de partes interessadas da indústria siderúrgica usam abordagens diversas para contabilizar energia e emissões. Embora múltiplas abordagens sejam aceitáveis, é importante explicar como os resultados se relacionam com as convenções adotadas em outros lugares, especialmente as da World Steel, uma instituição global do setor. Normas como a ISO 14404 e o BREF da Comissão Europeia também são referências importantes (IEA, 2020b).

29 Os gases de efeito estufa, incluindo CO_2, CH_4, N_2O, PFC, HFC e SF_6, são convertidos em CO_2 e ou CO_2 equivalente, usando a métrica GWP-100 do AR5, quinto relatório de avaliação do IPCC. A métrica de conversão para dióxido de carbono é equivalente à do 6º relatório de avaliação do IPCC (2023).

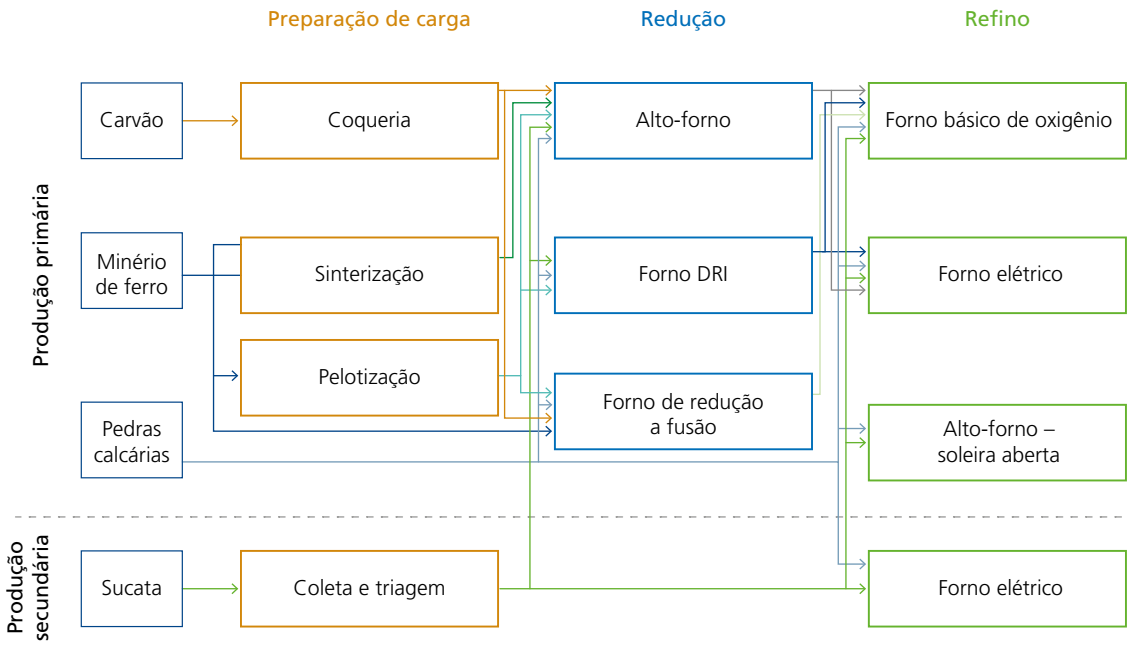
30 Disponível em: https://seeg.eco.br/dados/. Acesso em: 23 ago. 2023.

31 De forma mais detalhada, na etapa de redução, o minério de ferro reage com o agente redutor em altas temperaturas, fazendo com que o oxigênio no minério de ferro se combine com o carbono do agente redutor, formando dióxido de carbono e liberando ferro metálico, que segue para laminação.

32 Também conhecido como ferro-esponja.

De acordo com informações da IEA (2020b) e conforme ilustrado na Figura 4, cerca de 70% do aço bruto é produzido por meio de rotas integradas[33] (primárias), sendo o percentual restante produzido pela rota semi-integrada (secundária).

FIGURA 4. Principais rotas de produção siderúrgicas e fluxo de materiais em 2019

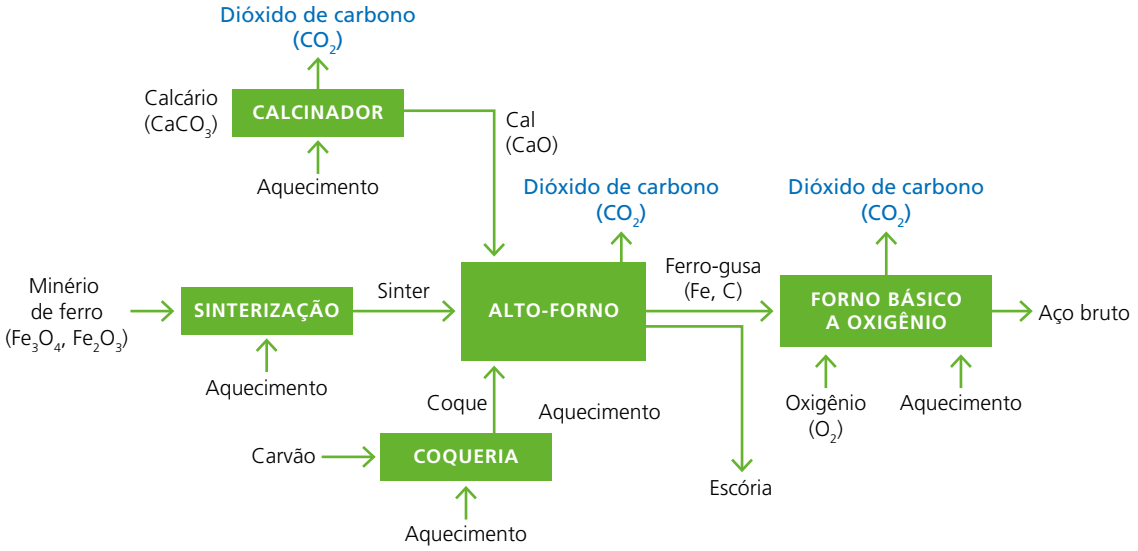


Fonte: Adaptado de IEA (2020b).

Aproximadamente 80% das emissões de GEEs provenientes da produção de aço bruto têm origem na etapa de redução do minério de ferro para a obtenção de ferro-gusa no alto-forno. Esse procedimento é altamente dependente do uso de carvão mineral, que desempenha o papel de agente redutor e de fonte de calor. O dióxido de carbono desse processo é gerado não só pela temperatura elevada excedendo os 1.000ºC, mas também pela reação de redução do minério, que utiliza carbono para retirada do oxigênio, tendo como resultado o ferro primário.

33 A forma de produção que se inicia a partir do minério de ferro é classificada como "primária", e aquela que se inicia com sucata e ferro-gusa é classificada como "secundária".

FIGURA 5. Processo simplificado da rota integrada via alto-forno



Fonte: Adaptado de Gross (2021).

No Brasil, de acordo com dados do Instituto Aço Brasil (IABr, 2021), 73% da produção de aço ocorre por meio da rota integrada a carvão mineral (coque); 11%, por meio da rota integrada a carvão vegetal, em substituição ao coque; e 16%, pela rota semi-integrada. O resultado é uma emissão média de 1,7 tonelada de CO2e por tonelada de aço bruto.

TABELA 3. Estimativa de emissões de CO2e pelas associadas do Aço Brasil (tCO2e/t aço bruto)

INTEGRADAS A COQUE	INTEGRADAS A CARVÃO VEGETAL	SEMI-INTEGRADAS	TOTAL
2,2	0,7	0,4	1,7

Fonte: Elaboração própria com base em dados de apresentação realizada pelo Instituto Aço Brasil em 11.7.2023 no Seminário de Descarbonização da Indústria Siderúrgica no BNDES.

Rotas de descarbonização da indústria siderúrgica

Para a descarbonização profunda do setor, é preciso uma abordagem completamente nova e transformadora para a fabricação de ferro primário e aço. Atualmente, já existem abordagens promissoras para a produção em escala industrial sem a emissão de CO_2, mas não existe uma solução única para a neutralidade das emissões.

Embora a meta de alcançar neutralidade líquida de carbono esteja definida para 2050, são necessárias ações imediatas. As instalações industriais têm uma vida útil que excede os cinquenta anos, e os horizontes de planejamento de investimentos abrangem de dez a quinze anos. Portanto, as decisões relativas a esses investimentos devem ser tomadas atualmente e devem ser guiadas por um plano claro de descarbonização, que combine metas de longo prazo, associadas a tecnologias disruptivas, com conquistas viáveis a curto e médio prazo, em geral com o uso de tecnologias já disponíveis.

No Quadro 1, consta o resumo de rotas identificadas para a descarbonização da siderurgia:

QUADRO 1. Rotas para descarbonização da siderurgia

Rotas de curto e médio prazo	Utilizam carbono como agente redutor, evitando a emissão de CO_2 fóssil	i. Eficiência energética; ii. Carvão vegetal e outros usos da biomassa de origem sustentável; iii. Otimização da carga metálica; iv. Maior uso da sucata; v. Uso de gás natural em substituição ao carvão mineral;
Rotas baseadas em tecnologias disruptivas	Utilizam carbono como agente redutor, evitando a emissão de CO_2 fóssil	vi. Autorredução (Tecnored); vii. Captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS);
	Substituem carbono como agente redutor	viii. Hidrogênio verde (H2v), gerando H_2O (água) em vez de CO_2; e ix. Utilização de energia elétrica por meio de um processo baseado em eletrólise.

Fonte: Elaboração própria.

ROTAS PARA DESCARBONIZAÇÃO NO CURTO E MÉDIO PRAZO

Para curto e médio prazo, a indústria conta com diversas estratégias de mitigação com tecnologia madura, que garantem uma transição suave ao longo do tempo, aproveitando o parque industrial sem grandes interrupções. Essas estratégias se inserem na categoria que ainda utiliza o carbono como agente redutor. Tais processos têm potencial para reduzir as emissões de CO_2, mas não oferecem uma produção de aço totalmente neutra em carbono. Para a descarbonização completa, como já citado, essas estratégias devem ser complementadas por mecanismos de CCUS (Vercammen, 2022). No entanto, o CCUS ainda não foi aplicado à produção de aço em alto-forno. Projetos-piloto estão sendo conduzidos para avaliar a viabilidade e eficácia do CCUS na indústria siderúrgica, mas não houve aplicação em escala comercial.

Eficiência energética

A produção siderúrgica é intensiva em energia. A eficiência energética das instalações varia de acordo com a rota de produção, o tipo e a qualidade do minério de ferro e carvão utilizados, o *mix* de produtos de aço, a tecnologia de controle de operação e a eficiência dos materiais.

Ao longo do tempo, a produção siderúrgica tornou-se mais eficiente e reduziu suas emissões, principalmente por meio da otimização do processo e da recuperação de calor e de materiais residuais. Tecnologias de eficiência energética que já estão ou estarão disponíveis nos próximos anos incluem diversas medidas para otimizar o funcionamento do alto-forno, como a redução da taxa de consumo de coque, por meio da injeção de carvão pulverizado, e o uso do resfriamento a seco de coque para promover a recuperação de calor. Materiais alternativos de injeção, como o hidrogênio, também podem ser usados. O uso dessas

alternativas reduziria as emissões associadas ao processo de coqueificação e melhoraria o desempenho dos altos-fornos convencionais.

Segundo a World Steel Association (2021), desde 1960, melhorias na eficiência energética resultaram em reduções de cerca de 60% na energia necessária para produzir uma tonelada de aço bruto. Ainda assim, o planejamento e o monitoramento contínuo do consumo de energia em tecnologias já maduras permanecem iniciativas importantes para mitigação. Sistemas avançados de gerenciamento de energia, que asseguram o uso eficiente e a recuperação de energia ao longo do processo de fabricação de aço, possibilitam uma redução das emissões de gases de efeito estufa da ordem de 2% a 4% nas usinas siderúrgicas de rota integrada (IABr, 2021).

Entretanto, uma vez que as tecnologias de eficiência energética são capazes de reduzir, mas não eliminar completamente, as emissões de GEEs, torna-se imperativo desenvolver outras inovações tecnológicas e estratégias de descarbonização.

Utilização de biomassa como agente redutor

A produção de aço via rota integrada utilizando carvão vegetal é um diferencial brasileiro em relação aos demais países. O Brasil é líder mundial na produção de aço, ferro-gusa, ligas metálicas e silício a partir do carvão vegetal. Como citado anteriormente, cerca de 11% da produção nacional de aço tem o carvão vegetal como componente essencial. Esse material é obtido a partir de florestas cultivadas especificamente para esse fim, o que o torna um biorredutor renovável. Durante o ciclo de crescimento das florestas designadas para a produção de carvão vegetal, ocorre a remoção e o armazenamento de carbono.

Segundo informações do IABr (2021), as empresas associadas que seguem a rota integrada com o uso de carvão vegetal mantêm cerca de 513 mil hectares de florestas plantadas. A madeira proveniente dessas florestas é transformada em carvão vegetal por meio de um processo de pirólise.

A utilização de carvão vegetal como biorredutor é uma tecnologia eficaz para a produção de aço com neutralização de carbono. Entretanto, a viabilidade do uso do carvão vegetal como redutor ou combustível alternativo em larga escala depende de diversos fatores, incluindo a garantia de suprimento, a disponibilidade de áreas para o plantio de florestas dentro de um raio econômico e a capacidade de rastrear a origem da biomassa. Essa tecnologia se mostra mais promissora na América do Sul do que na Europa, onde a disponibilidade e competitividade da biomassa não suportam sua aplicação na produção de aço de baixo carbono.

Além disso, o uso do carvão vegetal também encontra limitações técnicas na substituição do coque em processos tradicionais via alto-forno. O principal fator destacado por especialistas diz respeito à menor resistência mecânica do carvão vegetal em comparação ao coque de carvão metalúrgico.

No alto-forno, o carvão vegetal tende a se desintegrar, pois esses dispositivos são projetados para operar em grande escala, com maiores volumes de materiais e intensas condições operacionais. As grandes dimensões físicas dos altos-fornos[34] aumentam a pressão e o peso dos materiais sobre o carvão vegetal, exacerbando sua tendência à desintegração. Quando o carvão vegetal se fragmenta, resulta em maior geração de finos, os quais podem obstruir o fluxo de gases essenciais para a combustão eficiente e a redução do minério de ferro, o que compromete a eficiência operacional (Santos *et al*., 2009).

Em altos-fornos menores, como os das usinas brasileiras que já utilizam a rota a carvão vegetal ou os utilizados em processos de redução direta, as condições são menos severas, permitindo que o carvão vegetal mantenha sua integridade estrutural e resultando em uma produção de ferro-gusa com características comparáveis às obtidas com coque metalúrgico. Além disso, o carvão vegetal apresenta uma densidade energética inferior, de modo que são necessárias quantidades maiores para gerar o mesmo nível de calor que o coque, o que pode sobrecarregar a capacidade do alto-forno, dificultando a manutenção de temperaturas ideais e o controle preciso do processo.

Consequentemente, para implementar o uso do carvão vegetal de forma eficiente em substituição ao coque em usinas siderúrgicas integradas, seria necessário considerar a adaptação ou troca do alto-forno para acomodar as especificidades desse combustível alternativo.

Em um cenário mundial e nacional em que as usinas integradas a coque metalúrgico representam o maior volume de capacidade instalada (cerca de 70%) e considerando os elevados custos associados à troca de equipamentos (dos altos-fornos tradicionais para versões menores), o incremento da produção utilizando carvão vegetal como biorredutor provavelmente se dará inicialmente pela ampliação da capacidade existente, em vez de pela substituição direta dos equipamentos atuais.

Além da substituição do coque por carvão vegetal como redutor ou combustível, existem outras possibilidades de uso de biomassa no processo de fabricação de aço: a injeção de finos de biorredutor em altos-fornos a coque; a inserção de biomassa para composição com o carvão mineral em coquerias (*biocoke*); e a aglomeração de biomassa em briquetes ou pelotas para abastecimento de fornos de produção de ferro-gusa, como exemplificado na tecnologia de autorredução da Tecnored.[35] Os detalhes dessas aplicações serão abordados nos boxes 4 e 7.

---

34 Em média, os altos-fornos a coque têm 3 mil a 6 mil m³ de volume interno, com 30 a 40 metros de altura. Os altos-fornos a carvão vegetal têm 200 a 600 m³ de volume interno, com 10 a 20 metros de altura. Essas dimensões refletem as necessidades operacionais e as limitações associadas a cada tipo de combustível utilizado nos processos siderúrgicos.

35 Processo desenvolvido no Brasil (Noldin Júnior *et al*., 2005).

BOX 4. Caso de carvão vegetal (*biocoke*)

Gerdau

Na usina de Ouro Branco, a maior da Gerdau, há iniciativa que consiste na redução do consumo do carvão mineral por meio da substituição parcial por biomassa de eucalipto e casca de serragem.

Em 2022, foram utilizadas 21,36 mil toneladas de biomassa na unidade de Ouro Branco, evitando a emissão de 56,9 mil toneladas de CO2e, redução 70% maior do que a do ano anterior, primeiro ano do projeto.

A expectativa da Gerdau é de aperfeiçoar a experiência a partir de novas pesquisas, empregando resíduos de milho, café e bagaço de cana, e aumentar em quatro vezes o consumo de biomassa.

Otimização da carga metálica

Otimizar a composição da carga metálica que alimenta o alto-forno na produção de ferro-gusa pode resultar na redução do consumo de carvão como agente redutor, pois o minério de ferro de alta qualidade ou a sucata de boa qualidade contêm menos impurezas, demandando menor adição de coque para neutralizá-las a fim de garantir uma reação eficiente de redução do minério de ferro em ferro-gusa. O desafio está na disponibilidade de ferro em alta concentração em quantidade e preços economicamente viáveis.

Maior uso de sucata

O aço é totalmente e infinitamente reciclável, e sua reciclagem utiliza 74% menos energia do que a criação de aço bruto a partir do minério de ferro. O aço reciclado é processado para reutilização como insumo metálico em EAF na rota semi-integrada.

Como explicado anteriormente, o minério de ferro e a sucata de aço são usados para fornecer a carga metálica. É necessário um *input* metálico de 1,05 a 1,2 tonelada por tonelada de aço, sendo que a sucata de aço apresenta uma concentração metálica significativamente maior (>95%) do que o minério de ferro (tipicamente na faixa de 50% a 70%). Os insumos de energia são utilizados para fornecer calor para fundir a carga metálica e, no caso do minério de ferro, para reduzi-lo quimicamente (removendo o oxigênio). O aço reciclado não depende do carvão como fonte de energia, o que significa que pode utilizar eletricidade renovável e não produz emissões de CO_2.

Para cada tonelada de sucata de aço reciclada, é evitada a emissão de 1,5 tonelada de CO_2 (IABr, 2021). Contudo, não há sucata suficiente para satisfazer a procura global e as previsões sugerem que continuará a haver uma elevada procura por aço produzido a partir de minério de ferro.

O desafio para promover uma maior utilização de sucata reside na criação de incentivos que viabilizem coleta e processamento eficientes, com o intuito de ampliar a disponibilidade e melhorar a qualidade desse material. Conforme dados do IABr,[36] nos últimos anos, 42 nações, representando aproximadamente 68,5% da produção global de aço, implementaram restrições à exportação de sucata.

BOX 5. Caso de sucata

ArcelorMittal

O Programa XCarb é uma iniciativa da ArcelorMittal que agrupa todos os produtos fabricados com aço de baixa ou zero emissão de CO_2, utilizando tecnologias de descarbonização identificadas em seu *roadmap*. Seus principais objetivos vão além de demonstrar, em um esforço unificado, avanço tangível em direção à produção de aço neutro em emissões de CO_2; o programa também visa apoiar seus clientes na consecução de suas metas de sustentabilidade, ou seja, permite que os clientes reduzam suas emissões de escopo 3. O Programa XCarb é dividido em três iniciativas: XCarb Recycled and Renewably Produced, XCarb Green Steel Certificates e XCarb Innovation Fund.

Na iniciativa XCarb Recycled and Renewably Produced, os produtos são fabricados em fornos elétricos a arco (EAF), utilizando altos níveis de aço reciclado e 100% de energia renovável. Ao empregar elevados níveis de aço reciclado e energia renovável, os produtos XCarb Recycled and Renewably Produced contam com uma pegada de CO_2 extremamente baixa. Quando os materiais metálicos são 100% reciclados, essa pegada chega a aproximadamente 300 kg de CO_2 por tonelada de aço acabado.

A eletricidade usada no processo de fabricação de aço é verificada de forma independente, com uma garantia de origem que certifica sua procedência de fontes renováveis. Isso é assegurado por meio de aquisição de certificados de energia renovável (CER), uma oferta baseada no mercado que certifica que o portador tem uma quantidade específica (em megawatt-horas) de eletricidade gerada a partir de recursos de energia renovável.

No Brasil, a ArcelorMittal produziu o primeiro produto XCarb© da América Latina, o Vergalhão CA50S, com 100% de sucata de aço e 100% de energia renovável certificada.

Uso de gás natural em substituição ao carvão mineral

O gás natural desempenha um papel de relevância como combustível de transição em direção a tecnologias mais sustentáveis que ainda estão em evolução, como o hidrogênio verde.

36 Apresentação realizada pelo Instituto Aço Brasil em 11.7.23 no Seminário de Descarbonização da Indústria Siderúrgica no BNDES.

Em usinas de rota integrada (BF/BOF), o gás natural pode ser injetado nos altos-fornos como alternativa ao carvão mineral, com os benefícios de: redução das emissões de CO_2 associadas à produção de ferro-gusa; menor consumo de energia; e redução de emissões de enxofre e partículas, uma vez que o gás natural é mais limpo em comparação ao carvão e ao coque.

Além dos altos-fornos, o gás natural também pode ser utilizado na rota semi-integrada, como a produção de aço em EAFs, na qual é capaz de substituir outros combustíveis menos limpos, resultando em menores emissões de GEEs.

Apesar do potencial significativo do gás natural para reduzir as emissões de GEEs, sua viabilidade é condicionada a sua disponibilidade e competitividade. Desafios importantes incluem a infraestrutura de transporte de gás *offshore* e a tarifa, que é comparativamente mais alta no Brasil do que em outros países.

À medida que o uso do gás natural se torne economicamente atrativo no contexto brasileiro, suas aplicações na indústria siderúrgica podem acelerar a redução das emissões de GEEs.

É importante ressaltar que a substituição do coque e de outros combustíveis tradicionais pelo gás natural é apenas um passo na direção da redução das emissões de GEEs na indústria siderúrgica, pois, ainda que seja capaz de reduzir as emissões, não as elimina.

BOX 6. Caso de uso de gás natural

ArcelorMittal

Dentro da iniciativa XCarb Green Steel Certificates, do Programa XCarb, os certificados XCarb™ de aço sustentável são especificamente concebidos para os produtos planos da ArcelorMittal fabricados a partir de minério de ferro em altos-fornos. As reduções nas emissões de CO_2 podem ser alcançadas, por exemplo, por meio da injeção de gás natural ou do uso de biomassa.

Essas reduções são verificadas e atestadas por um auditor independente, transformando-se em certificados XCarb© Green Steel. Os clientes da ArcelorMittal podem utilizar esses certificados para contabilizar e relatar uma redução em suas emissões de GEEs de escopo 3.

No Brasil, a ArcelorMittal está incorporando a participação de gás natural no *mix* de combustíveis tradicionais (coque e carvão mineral) por meio de uma injeção parcial. Existe potencial para injeção em três altos-fornos em Tubarão (ES), um alto-forno em Pecém (CE) e um alto-forno em João Monlevade (MG). A estimativa é de geração de 15 mil toneladas equivalentes aos certificados XCarb©.

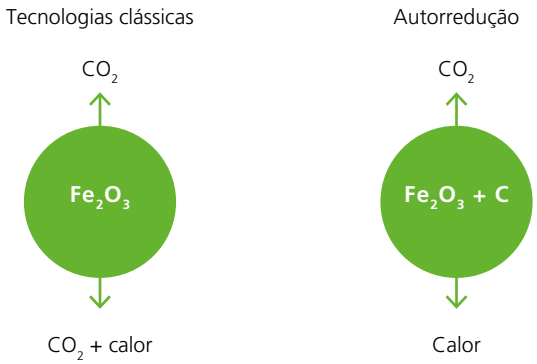
Em resumo, as iniciativas de curto e médio prazo conseguem reduzir as emissões de dióxido de carbono, porém não eliminam totalmente o problema, o que as torna inadequadas como soluções de longo prazo. As tecnologias disruptivas e menos intensivas em relação à energia e ao carbono se encontram em diferentes estados de maturidade tecnológica e custos de produção.

ROTAS PARA DESCARBONIZAÇÃO COM TECNOLOGIAS DISRUPTIVAS

Autorredução

Como descrito anteriormente, a rota integrada via alto-forno abarca as três etapas fundamentais do processo siderúrgico: redução, refino e laminação. Nesse sentido, o aço é gerado a partir da redução do minério de ferro, processo no qual o carvão (seja mineral ou vegetal) atua como agente redutor, resultando em ferro-gusa. Por outro lado, os processos baseados na tecnologia de autorredução utilizam aglomerados nos quais o minério de ferro (ou resíduos contendo óxido de ferro) é combinado com material carbonoso. Esse material desempenha a função de reduzir os óxidos presentes. Diferentemente da rota convencional, na qual o agente redutor (carvão mineral ou vegetal) é adicionado separadamente, na autorredução a combinação dos elementos ocorre de forma integrada nesses aglomerados (Figura 6).

FIGURA 6. Comparação entre a rota convencional e a autorredução



Fonte: Adaptado de Noldin Junior e outros (2005).

O processo Tecnored exemplifica uma tecnologia de autorredução. Considerada uma inovação disruptiva, a Tecnored já está disponível e possibilita a utilização direta de carbono proveniente de fontes sustentáveis na composição da carga dos fornos durante a produção de ferro-gusa.

BOX 7. Caso de autorredução

Gavea Tech Ltda

A Gavea Tech Ltda. é uma *startup,* criada em 2019, dedicada a pesquisa em autorredução desde 1973. Suas iniciativas, em cooperação com outras instituições de ciência e tecnologia (ICT), como Universidade de São Paulo (USP), Universidade Federal Fluminense (UFF), Tohoku, Osaka, Hokaido etc., e com o setor industrial (Fundição Tupy, Caemi-MBR, Logus, Cargill, Gerdau, Vibasa, Vale etc.), resultaram em importantes desenvolvimentos, destacadamente no processo Tecnored, tecnologia já transferida para a Vale, hoje detentora da empresa Tecnored.

Tecnored

O processo Tecnored é uma tecnologia inovadora, patenteada em mais de trinta países, concebida para a produção de ferro-gusa por meio da redução de aglomerados autorredutores (briquetes ou pelotas) em um forno de tamanho e características diferenciadas.

Os aglomerados autorredutores são preparados a partir de uma mistura que contém óxido de ferro, agente redutor, ligante e fluxante. O óxido de ferro pode vir de finos de minério de ferro ou resíduos ferrosos, e o agente redutor pode ser proveniente de finos de coque verde de petróleo, carvão vegetal, carvão mineral ou resíduo carbonoso. O método de aglomeração usado no processo Tecnored é o de briquetagem. Os aglomerados autorredutores, briquetes, são produzidos e curados a frio, ou em fornos de cura que operam a baixas temperaturas, o que traz vantagens do ponto de vista energético, ambiental e econômico. O combustível necessário ao processo é produzido de forma semelhante, pela aglomeração de um agente ligante adicionado a um material carbonoso, que pode ser biomassa ou carvões não coqueificáveis.

Os briquetes são carregados no forno Tecnored, um forno de cuba com geometria diferenciada, em que são reduzidos e fundidos com a energia gerada pela queima do combustível.

A grande flexibilidade de uso de matérias-primas, o reaproveitamento de 100% dos resíduos gerados no próprio processo e a eliminação das etapas de coqueria e sinterização do processo siderúrgico são alguns dos grandes diferenciais da Tecnored. Esses fatores contribuem, ainda, para redução expressiva na emissão de particulados e CO_2, além de reduzir o opex e capex para implantação de uma unidade produtora.

(continua)

(continuação)

3G e 4/5G

Com a continuidade dos estudos de PD&I sobre autorredução, a Gavea Tech concebeu, em 2019, sua primeira patente, a 3G, que propõe uma tecnologia disruptiva de descarbonização radical do alto-forno, baseada e complementada por uma rede de suprimento de biocarbono de várias origens. A realização da primeira das três fases propostas para o desenvolvimento do chamado "auto-forno", utilizando a tecnologia Gavea Tech de conversão de altos-fornos à autorredução, se encontra em negociação com empresas do setor de mineração, siderurgia e logística. Em julho de 2023, a Gavea Tech depositou no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) sua segunda patente, a 4/5G, que apresenta um novo processo disruptivo de fabricação de aço no qual, entre outras características, propõe-se a eliminação de uma unidade operacional tradicional da cadeia siderúrgica. Com reflexos marcantes no opex e capex das usinas, também é esperada uma contribuição significativa de mitigação das emissões de GEEs pelo setor. Finalmente, para viabilizar industrialmente todas as inovações tecnológicas propostas, a Gavea Tech tem colocado em debate a criação de empresa a ser estruturalmente concebida para esse fim.

Captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS)

A descarbonização completa da siderurgia, mantendo a rota tecnológica que utiliza o carbono como agente redutor, demanda investimentos em infraestrutura de captura, uso ou estoque de carbono nas plantas existentes. A estratégia de CCUS envolve a captura do CO_2 gerado antes que ele possa ser liberado na atmosfera; a utilização do CO_2 capturado, sempre que possível; e seu armazenamento a longo prazo quando não utilizado. Trata-se de uma rota transversal considerada nos *roadmaps* de descarbonização de setores *hard-to-abate*, em geral, para alcance da neutralidade de carbono no horizonte de 2050. Apesar de estar presente em diversas estratégias também da siderurgia, essa rota não foi explorada pelas empresas nos seminários.

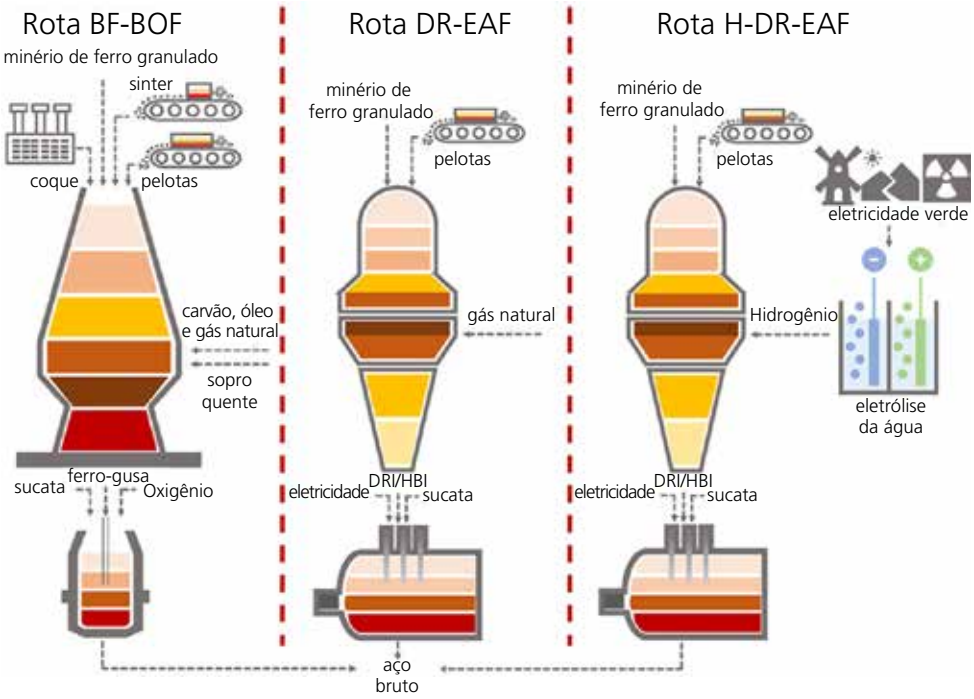
Substituição do carbono como agente redutor pelo hidrogênio verde

No Brasil, a produção de aço baseada em hidrogênio verde pode se tornar uma tecnologia importante a longo prazo para reduzir as emissões. No entanto, essa tecnologia ainda enfrenta desafios em termos de produção e redução dos custos operacionais. Atualmente, vem sendo analisado um caminho de viabilidade para a transição da operação siderúrgica via rota de alto-forno com forno de conversão a oxigênio (BF/BOF) para a rota de redução direta a hidrogênio verde com forno de arco elétrico (H-DR/EAF).

Esse caminho de transição se inicia com a otimização da rota integrada via alto-forno (BF/BOF), seguida pela transição gradual para a utilização de fornos elétricos (EAF) usando

sucata e ferro reduzido diretamente via gás natural (DRI a gás) ou briquetes de *hot briquetted iron*[37] (HBI). Por fim, é adotada a produção via EAF neutro em carbono usando uma combinação de sucata e DRI à base de hidrogênio. A proporção entre a produção baseada em sucata e a produção baseada em DRI dependerá dos futuros portfólios de produtos e das necessidades de mercado. O método de redução direta usando hidrogênio será fundamental para permitir a produção de aços de alta pureza no futuro sem emissão de dióxido de carbono.

FIGURA 7. Comparação entre fornos de O_2 e H_2 e a evolução das rotas tecnológicas



Fonte: Adaptado de Wang e outros (2021).

Na rota DR-EAF (redução direta – forno elétrico a arco), a redução do minério de ferro a produto metálico (ferro-esponja ou DRI) é efetuada sem a fusão no alto-forno, equipamento não existente nessa rota[38] e responsável por 80% das emissões dos GEEs na rota integrada. No processo tradicional de alto-forno, como já citado, o produto metálico é o ferro-gusa produzido a partir do minério de ferro.

37 O DRI é o produto primário da redução direta do minério de ferro. O HBI é uma forma mais densa e processada do DRI, projetada para melhorar sua manipulação e eficiência no transporte. Por ser uma forma menos reativa, seu transporte é mais simples.

38 Ver Figura 5. Esse procedimento é altamente dependente do uso de carvão mineral, desempenhando o papel de agente redutor e de fonte de calor. O dióxido de carbono desse processo é gerado não só pela temperatura elevada, excedendo os 1.000 °C, mas também pela reação de redução do minério, que utiliza carbono para retirada do oxigênio, tendo como resultado o ferro primário.

Nos processos de redução direta, o produto metálico (DRI) é produzido diretamente a partir do minério de ferro, sem passar pelo estágio líquido do ferro-gusa, como o próprio nome sugere. Geralmente, utiliza-se um minério de ferro de alta qualidade, com composição adequada para a redução direta, alimentado em um reator ou forno específico. Junto com o minério, é adicionado um agente redutor, como gás natural ou gás de síntese. Em altas temperaturas, esse agente reage com o minério de ferro, removendo o oxigênio e produzindo o ferro metálico (DRI), que é então utilizado como matéria-prima nos fornos elétricos a arco (EAF), nos quais é fundido para a obtenção do aço.

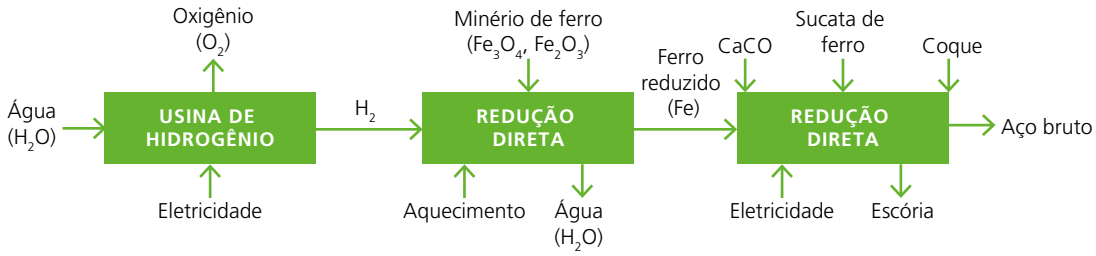
Além da redução das emissões de CO_2, uma das características distintivas do DRI como carga para os fornos elétricos é sua superioridade em relação à sucata em termos de pureza (Mourão, 2007). O DRI de alto teor possibilita a geração de produtos siderúrgicos de qualidade superior, que, de outra maneira, exigiria sucata de aço da mais alta qualidade. Em situações em que a disponibilidade de sucata é limitada, o uso de DRI torna-se essencial para assegurar características específicas de qualidade.

O DRI pode ser produzido com gás natural como alternativa de combustível de transição até que haja a implantação do ecossistema de *upstream* do hidrogênio verde em larga escala. Entretanto, essa fase de transição requer gás natural disponível a preço competitivo.

A mudança da rota para EAF com DRI a gás natural tem o potencial de reduzir as emissões de CO_2, porém não é capaz de eliminá-las completamente.

Na etapa seguinte, ocorre a transição da rota DR-EAF, na qual o gás natural é o agente redutor e combustível, para a rota EAF com H-DR, em que o hidrogênio verde desempenha esse papel. O hidrogênio verde é produzido por meio da eletrólise da água, utilizando eletricidade renovável. Posteriormente, esse hidrogênio atua como agente redutor do minério de ferro, substituindo fontes de carbono para a formação do DRI. O oxigênio no minério de ferro se combina com o hidrogênio para produzir água (em vez de combinar com carbono para produzir CO_2), eliminando as emissões de CO_2 dessa parte do processo. No EAF, o DRI é aquecido e liquefeito com sucata de aço para a produção de aço bruto. O uso de eletricidade nesse processo, desde que proveniente de fontes renováveis, não resulta em emissões de carbono.

FIGURA 8. Exemplo de processo simplificado da redução direta a hidrogênio



Fonte: Adaptado de Gross (2021).

Atualmente, nenhuma siderúrgica utiliza o processo de redução direta a hidrogênio em escala comercial, mas um consórcio de empresas na Suécia já possui uma planta-piloto e planeja iniciar a construção de uma planta de demonstração em escala industrial em 2024 (Hybrit, 2022).

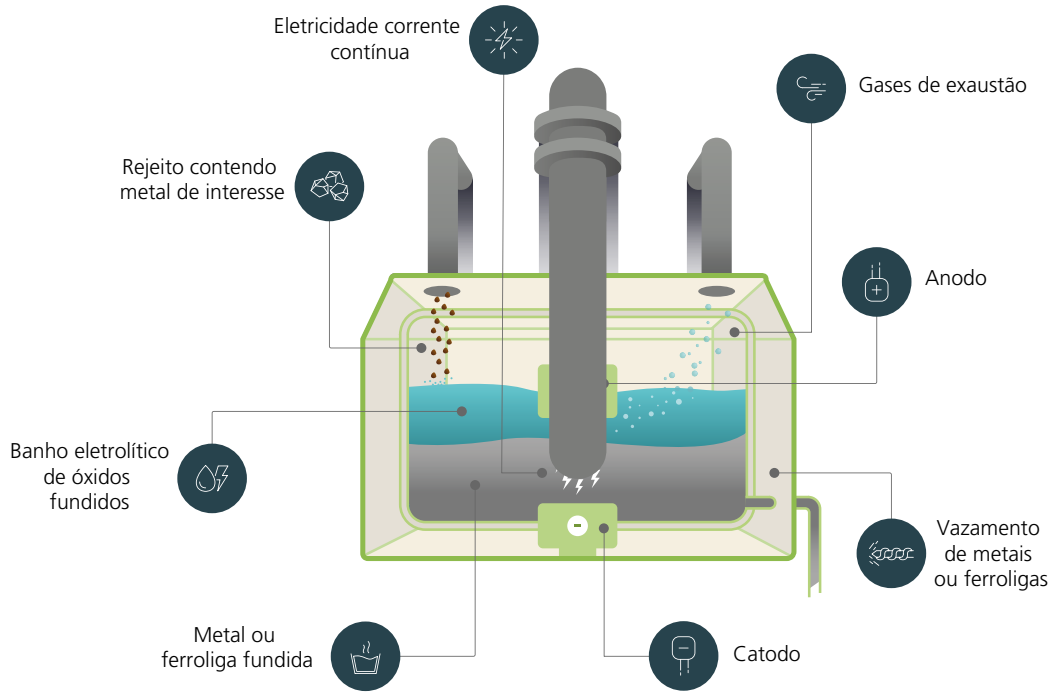
Por fim, uma abordagem promissora para a fabricação de ferro em escala industrial sem a emissão de CO_2 é a utilização de energia elétrica por meio de um processo baseado em eletrólise.

A utilização de energia elétrica por meio de um processo baseado em eletrólise

Há duas formas potenciais de reduzir o minério de ferro removendo o oxigênio: por meio do uso de agentes redutores químicos, como hidrogênio ou carbono, ou por meio de processos eletroquímicos que utilizam energia elétrica. Uma vez que a eletrólise não produz CO_2, pode ser livre de carbono, mas, para isso, a eletricidade para alimentar o processo deve necessariamente ser gerada sem emissões, e o consumo de eletrodos tampouco deve resultar em emissões de CO_2.

Em 2022, a Boston Metal inaugurou uma filial no Brasil e deu início à construção de uma planta industrial de demonstração de 720 toneladas, programada para entrar em operação em 2024.

FIGURA 9. Eletrólise de óxido fundido



Fonte: Boston Metal do Brasil (2023).

Em resumo, as iniciativas de curto e médio prazo apresentadas pela indústria siderúrgica conseguem reduzir as emissões de dióxido de carbono, porém não eliminam totalmente o problema, o que as torna inadequadas como soluções de longo prazo. Além disso, as estratégias de mitigação precisam levar em consideração fatores específicos de cada instalação industrial, como a disponibilidade de matérias-primas, agentes redutores e a viabilidade técnico-econômica para CCUS.

Tecnologias disruptivas de descarbonização estão em diferentes estágios de maturidade tecnológica e custos de produção. Atualmente, há grande expectativa de que as rotas via DRI com o uso de hidrogênio alcancem, no longo prazo, participação significativa na produção de aço neutra em carbono.

O Brasil, dotado de vastas reservas de minério de ferro de excelente qualidade, material essencial para a produção de DRI de alto teor, além de uma capacidade comprovada na produção em larga escala de biomassa certificada e uma matriz energética baseada predominantemente em fontes renováveis, encontra-se em uma posição favorável para aproveitar esse cenário. Entretanto, existem desafios que serão abordados mais para frente.

Indústria de mineração

A indústria de mineração está na base de diversas outras indústrias. Elementos[39] como ferro, bauxita, nióbio, manganês, ouro e lítio são extraídos das minas e transformados em minerais industriais e ligas metálicas e utilizados nas indústrias metalúrgica, química, de fertilizantes, de cimento/construção civil, eletrônica etc., representando o início de uma extensa cadeia de valor. Adicionalmente, em um cenário de transição para uma economia de baixo carbono, espera-se que a indústria de mineração forneça os materiais essenciais para energias renováveis e acumuladores de energia.

De acordo com o *II Inventário de gases efeito estufa do setor mineral*, realizado pelo Instituto Brasileiro de Mineração (Ibram), o total de emissões desse segmento representou 0,9% das emissões brasileiras (Ibram, 2014) em 2011. O Brasil apresenta, pelas características de suas minas e matriz energética, emissões mais baixas do que as de outros países mineradores (Brasil, 2013; Carvalho; Mesquita; Melo, 2016).

Principais processos emissores

O processo produtivo da mineração se desdobra em três fases distintas. A primeira é a pesquisa mineral, que visa descobrir os recursos minerais de interesse no subsolo. Na segunda

39 Além do minério de ferro de alta qualidade, o Brasil também fornece 9% do alumínio e da bauxita, 7% do grafite e 90% do nióbio mundial, e tem grande potencial para a produção de cobre, lítio, níquel, fosfato, potássio, urânio e terras raras. No país, encontram-se 94,12% das reservas de nióbio, 22,42% do grafite, 16,15% de terras raras e 16% do níquel de todo o mundo.

fase, denominada lavra, ocorre a extração e o transporte do recurso para as instalações de manuseio. Por fim, a terceira fase é o beneficiamento, que consiste no tratamento dos bens extraídos para sua aplicação em diversas indústrias, como química, metalúrgica e cerâmica. No beneficiamento, ocorrem etapas de cominuição, concentração e separação, que promovem no minério as alterações químicas e metalúrgicas que caracterizam as indústrias de transformação mineral. Desde a extração até o beneficiamento, predominam processos de transformação mecânica. Logo, não há emissão de processo.

Durante a pesquisa mineral, os investimentos de maior vulto decorrem da realização de furos de sondagem, conforme características mapeadas do território a ser minerado. Não são registradas grandes emissões na fase de pesquisa mineral.

Na fase de lavra, as principais etapas incluem perfuração, carregamento com explosivos, desmonte com explosivos ou equipamentos, carregamento e transporte do minério. A perfuração está essencialmente relacionada às movimentações de equipamentos. Na etapa de desmonte da rocha com ou sem explosivos, existe a emissão de particulados, mas não de GEEs. Já a etapa de carregamento e transporte em caminhões fora de estrada é responsável pela maior parcela de emissões de GEEs.

Na fase de beneficiamento, há emissão de gases de efeito estufa proveniente do consumo energético do processo, principalmente durante as etapas de cominuição, peneiramento, concentração e separação de sólidos e líquidos, dedicadas a elevar o teor dos minérios de interesse e eliminar impurezas no produto desejado. A disposição de rejeitos e concentrados requer movimentação significativa de material e equipamentos, como máquinas, tratores e caminhões.

Em resumo, as principais fontes de emissões de GEEs da mineração, considerando apenas escopos 1 e 2, são: (i) o consumo de energia no beneficiamento; e (ii) o consumo de combustível utilizado no transporte de minério dentro da mina. Segundo Ibram (2014), 90% das emissões de GEEs na mineração resultam dessas atividades.

Rotas de descarbonização da indústria de mineração

Ao contrário de setores como cimento, siderurgia, química e fertilizantes, nos quais entre 40% e 70% das emissões de GEEs resultam do processo produtivo, na indústria de mineração as principais fontes de emissões de GEEs derivam principalmente do consumo de energia de origem fóssil, seja no beneficiamento ou no transporte.

Embora não exista uma solução única, a indústria de mineração pode adotar diversas medidas, adaptadas a suas características específicas, com o intuito de diminuir o consumo de energia de alta pegada de carbono. Essas ações envolvem melhorias nos processos de mineração, aumento da eficiência energética de plantas e equipamentos, inovações para integrar fontes de energia de baixo carbono e otimizações no transporte.

Por outro lado, as emissões de GEEs de escopo 3 representam 90% do total da cadeia produtiva da indústria de mineração, conforme apontado por Soliman, Fletcher e Crocker (2017). As principais fontes das emissões de escopo 3 na mineração estão associadas ao uso dos produtos da mineração na produção de aço, bem como ao transporte marítimo de minério de ferro e outros produtos. Logo, a redução dessas emissões torna-se de extrema importância, uma vez que elas superam emissões dos escopos 1 e 2 combinadas. Nesse sentido, a descarbonização do setor de mineração deve transcender as fronteiras convencionais, por meio de iniciativas que busquem reduzir as emissões ao longo de toda a cadeia de valor.

O Quadro 2 traz um resumo de rotas identificadas para a descarbonização da mineração:

QUADRO 2. Rotas para descarbonização da indústria de mineração

Rotas de escopo 1 e 2	i. Eficiência energética; ii. Fontes de energia de baixo carbono; iii. Eletrificação;
Rotas de escopo 3	iv. DRI e aglomerados; e v. Novas tecnologias (autorredução e energia para navegação).

Fonte: Elaboração própria.

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A otimização energética faz parte do esforço contínuo de melhoria operacional e inclui trocas de equipamentos ou adequação de sistemas que reduzam o consumo de combustível ou eletricidade. Essa abordagem, além de reduzir o consumo de energia, tem o potencial de contrabalançar a tendência natural de aumento das emissões específicas por tonelada de minério ofertada ao mercado, influenciada pela redução progressiva do teor de minérios de interesse nas minas e pelo consequente aumento, ao longo do tempo, da relação entre o material de estéril ou rejeito e o minério concentrado (Carvalho; Mesquita; Melo, 2016).

FONTES DE ENERGIA DE BAIXO CARBONO

Na busca pela redução de emissões de GEEs de escopo 1, diversas medidas podem ser consideradas para substituir fontes energéticas por combustíveis de menor intensidade de carbono. Na pelotização, destacam-se tanto a substituição do antracito pelo biocarbono, derivado de biomassa certificada de origem vegetal, quanto a substituição do gás natural e do óleo combustível pelo biometano. Para diminuir o consumo de *diesel* nos equipamentos de mina, opções como biocombustíveis ou eletrificação podem ser adotadas. Por fim, nas operações ferroviárias, surgem alternativas como biodiesel, óleo vegetal hidrotratado (*hydrotreated vegetable oil* – HVO), etanol e amônia.

BOX 8. Caso de fonte de energia de baixo carbono de escopo 1

Vale

Projeto de produção de pelota sem o uso de carvão antracito. Realizado na pelotizadora de Vargem Grande (MG), o teste substituiu 100% do combustível fóssil por biocarbono no processo de queima da pelota, aglomerado de minério de ferro utilizado na produção de aço na siderurgia (Gráfico 7). O biocarbono é um produto renovável, obtido pela carbonização de biomassa, considerado de emissão zero.

Na Vale, o carvão antracito corresponde a cerca de 50% das emissões de CO_2 na pelotização, que, por sua vez, é o processo mais intensivo em carbono considerando as emissões diretas da companhia. Atualmente, a pelotização corresponde a 30% do total do escopo 1. O teste foi iniciado com taxa de substituição de 50% do carvão pelo biocarbono, evoluindo gradativamente até chegar a 100%. No total, foram produzidas cerca de 50 mil toneladas de pelotas, das quais 15 mil contavam com 100% de biocarbono de origem certificada.

Sigma Lithium

A empresa estruturou projeto para aumentar para 50% a frota de caminhões movida a biodiesel até 2025. Hoje, 15% da frota utiliza esse combustível. Além disso, a empresa adotou estratégias de simulação computadorizada de carga para reduzir o uso de explosivos na extração do mineral. Atualmente, 57% das emissões da empresa são provenientes do uso do *diesel* no transporte de minério dentro da mina e no transporte para o porto. Essa medida é capaz de reduzir em 29% as emissões de CO_2.

Em relação ao escopo 2, a empresa utiliza 100% de energia renovável e recircula 100% da água.

Em relação ao escopo 2, que inclui as emissões indiretas associadas à produção de eletricidade utilizada pela indústria de mineração, surgem como estratégias a transição para energias renováveis, a cogeração de energia e a compra de créditos de energia limpa.

BOX 9. Caso de fontes de energia de baixo carbono de escopo 2

Vale

Projeto de Energia Solar: o projeto teve início em novembro de 2022 no município de Jaíba, na região norte de Minas Gerais. Fazem parte dele uma subestação e uma linha de transmissão de 15 km de extensão, com tensão de 230 mil volts, interligando as subestações Coletora Sol do Cerrado e Jaíba, que fornecem energia para o Sistema Interligado Nacional. Os investimentos feitos pela empresa somam cerca de R$ 3 bilhões (US$ 590 milhões). A Vale pretende reduzir emissões líquidas de carbono em 33% até 2030 e zerá-las até 2050. A energia gerada pela Sol do Cerrado reduzirá as emissões em 134 mil tCO_2e/ano, o que representa a emissão de aproximadamente 100 mil carros compactos.

Mineração Rio do Norte (MRN)

Projeto Linha de Transmissão: projeto de construção de uma linha de transmissão de 98 km, substituindo o óleo combustível como fonte de energia pela matriz elétrica. A expectativa é de uma redução aproximada de 25% na emissão de CO_2e, equivalente a 1,6 milhão de toneladas de CO_2e no período de 2025 a 2038, ou 6,3 mil hectares de floresta tropical.

Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM)

Desde 2019, toda a energia elétrica utilizada no complexo industrial da CBMM é 100% renovável e certificada pela Companhia Energética de Minas Gerais S.A. (Cemig): o Certificado de Energia Renovável (REC) evidencia emissão zero de GEEs. No ano de 2023, a empresa atingiu uma redução de cerca de 50% de suas emissões em relação ao ano de 2015.

Kinross

As usinas hidrelétricas de Caçu (em Caçu – GO) e Barra dos Coqueiros (em Cachoeira Alta – GO) são parte do Grupo Kinross desde 2018. Elas estão localizadas no rio Claro, no estado de Goiás, e asseguram um fornecimento de energia de longo prazo para a operação da Kinross no município de Paracatu, resultando em menores custos de produção ao longo da vida útil da mina. Ambas as usinas estão em operação desde 2010 e têm uma capacidade instalada total de 155 MW (90 MW para a Barra dos Coqueiros e 65 MW para Caçu). Fornecem, aproximadamente, 70% das necessidades de energia da Kinross Paracatu.

ELETRIFICAÇÃO

A eletrificação é uma abordagem que vem sendo utilizada para viabilizar a descarbonização do transporte dentro e fora das minas. Essa estratégia compreende o uso de correias trans-

portadoras associadas à britagem na mina e equipamentos avançados para a mineração, como auxílio elétrico a caminhões e veículos híbridos.

No entanto, essa mudança envolve um alto valor de investimento e desafios operacionais significativos. O uso de correias transportadoras depende da configuração da mina, pois o plano de lavra, por vezes, precisa ser ajustado, e a correia transportadora não é facilmente modificada, reduzindo a flexibilidade do processo. Para o transporte fora da mina, na tentativa de reduzir o consumo de *diesel*, a medida passa pela eletrificação da frota de caminhões de estrada. O principal obstáculo para a eletrificação de grandes caminhões de mineração é a necessidade de reduzir o extenso tempo de carregamento das baterias, agravado pela baixa maturidade tecnológica e pela robustez desses veículos, enquanto operações remotas complicam o acesso a pontos de abastecimento renovável. Apesar disso, as empresas estão explorando estudos para potencial eletrificação de caminhões menores ou a adoção de soluções híbridas em locomotivas.

BOX 10. Caso de eletrificação

Vale

A empresa desenvolveu um projeto-piloto, com caminhões fora de estrada de 72 toneladas movidos a bateria em substituição ao *diesel*. A indústria de mineração demanda tecnologias de carga rápida em larga escala, capazes de fornecer energia suficiente para carregar e impulsionar um caminhão ao longo do ciclo de transporte, que engloba carga, deslocamento, despejo, retorno e espera.

Os caminhões fora de estrada elétricos de 72 toneladas, atualmente em fase de teste pela Vale, estão equipados com baterias de lítio que apresentam uma capacidade de armazenamento de 525 kWh, que os permite operar por até 36 ciclos, o equivalente a pouco mais de um dia de atividade, sem a necessidade de interrupções para recarga. Além disso, a tecnologia incorporada possibilita a regeneração de energia durante descidas, prometendo reduzir a dependência do freio mecânico, assim como os custos de manutenção e a ocorrência de vibrações. Segundo a empresa, a solução baseada em eletrificação em baterias será restrita a caminhões de até 100 toneladas.

CBMM

Aplicação de transporte por correia movida a energia elétrica. Na CBMM, o minério lavrado é transportado da mina para o pátio de homogeneização por uma correia transportadora elétrica, dispensando, assim, a utilização de caminhões e diminuindo a emissão de GEEs. O minério de pirocloro é retomado da pilha de homogeneização e transferido, também via correia transportadora, para beneficiamento na unidade de concentração.

EVOLUÇÃO DO DRI E DOS AGLOMERADOS PARA REDUÇÃO DE EMISSÕES DE ESCOPO 3

Como mencionado anteriormente, está em análise um caminho de transição na siderurgia que começa com a otimização da rota integrada via alto-forno (BF/BOF), seguida pela transição gradual para a utilização de fornos elétricos (EAF) utilizando sucata e ferro reduzido diretamente via gás natural (DRI a gás) ou briquetes de HBI.[40] Por fim, adota-se a produção via EAF neutro em carbono, utilizando uma combinação de sucata e DRI à base de hidrogênio.

Essa transição promete um aumento significativo na demanda por DRI/HBI, segmentada de acordo com o nível de pureza e a intensidade de carbono, uma vez que esse produto pode ser utilizado de várias maneiras para contribuir com a redução das emissões de carbono na indústria siderúrgica.

QUADRO 3. Diferentes tipos de DRI/HBI por processo siderúrgico

DRI/HBI DE ALTO TEOR	BOF (DRI/HBI utilizado como substituto de sucata na siderurgia convencional)	H2-DRI-EAF (Rota do aço verde baseada no uso de H_2 verde e pelotas de alta qualidade)
DRI/HBI DE BAIXO TEOR	BF (DRI/HBI usado como parte da carga de minério de ferro do alto-forno para reduzir as taxas e emissões de coque)	SAF* (OTA SAF/Melter para produzir aço verde permitindo o uso de insumos de minério de ferro de menor teor)
	DRI/HBI	**DRI/HBI VERDE**

Fonte: Moya e outros. (2024).
Nota: * Nessa nova rota de fabricação de aço, adiciona-se uma etapa de fusão em forno de arco submerso (*submerged arc furnace* – SAF) após a produção de DRI, antes de enviá-lo para um BOF existente.

Atualmente, a produção de HBI/DRI com gás natural já é capaz de reduzir a emissão de GEEs em aproximadamente 60% (Vale assina..., 2022), quando comparada com a produção pela rota integrada BF/BOF. As barreiras associadas a essa rota referem-se ao valor do investimento e à oferta de gás natural a preço competitivo. Regiões com preços baixos de gás natural, como o Oriente Médio ou a América do Norte, destacam-se como grandes produtores de DRI, enquanto o processo é menos comum na Europa.

Algumas siderúrgicas europeias optam por importar HBI, por ser uma forma menos reativa e, portanto, mais facilmente transportável do DRI. Esse HBI é utilizado tanto no alto-forno BF, para otimizar a mistura de carga, quanto no EAF, no qual é misturado com sucata para aprimorar a qualidade.

40 Após a produção do DRI, ele é compactado em forma de briquetes e, em seguida, submetido a um processo de briquetagem a quente para formar o HBI.

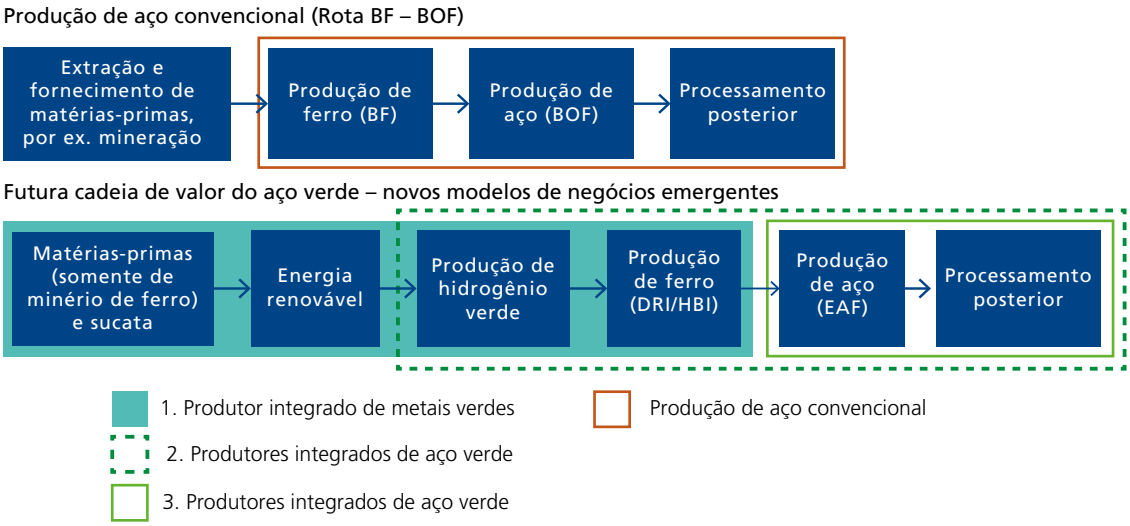
No futuro, a substituição de gás natural por hidrogênio e a utilização de energia renovável poderão eliminar as emissões de CO_2 de escopo 3 na produção de aço por meio de redução direta (DRI), conforme rotas do lado direito da Figura 7.

De acordo com a análise do Commodities Research Unit Group (CRU, 2024), prevê-se que o DRI/HBI de alta qualidade e baixa intensidade carbônica, destinado à produção de aço em EAF, seja a opção tecnológica mais demandada a longo prazo. No entanto, outras rotas estarão presentes, como fornos de arco submerso (SAF), altos-fornos (BF) e fornos básicos de oxigênio (BOF).

O Brasil apresenta os pré-requisitos para a produção competitiva de DRI/HBI devido ao acesso ao minério de ferro de alta qualidade e à disponibilidade de energia renovável.

Como resultado, há potencial para uma significativa reorganização global da cadeia de valor da produção de ferro e aço, na qual a oferta disponível de DRI/HBI de regiões como Oriente Médio e Brasil (que têm o potencial de se tornarem centros globais para exportações de DRI/HBI com baixas emissões de carbono) seria enviada para países e regiões importadoras em crescimento.

FIGURA 10. Potencial reorganização da cadeia de valor da produção de ferro e aço



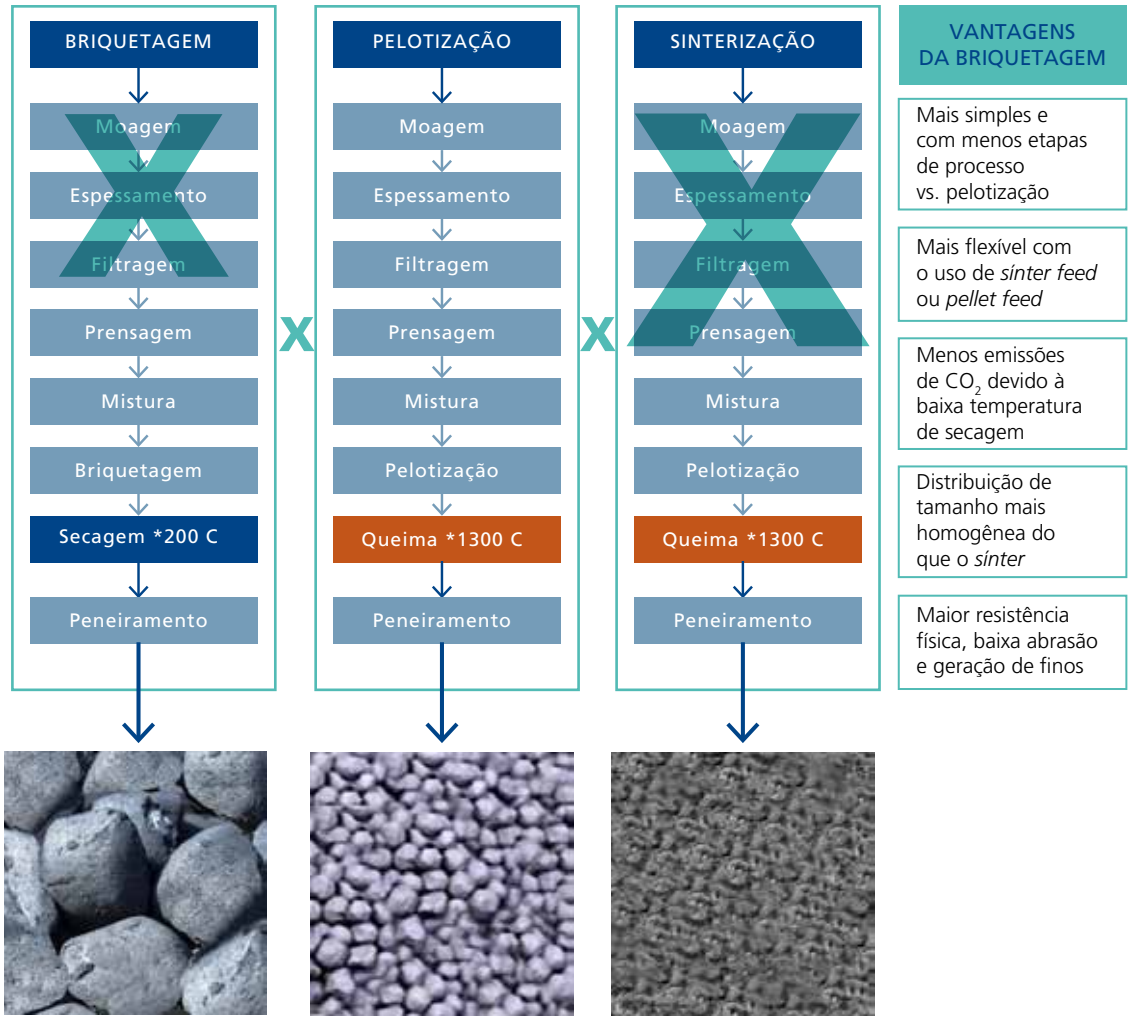
Fonte: Elaboração própria com base em dados do CRU (2024).

A crescente demanda da siderurgia por produtos minerais de alta qualidade, com potencial de reduzir as emissões de CO_2, tem despertado interesse na indústria de mineração, que convive com o desafio de redução de emissões de escopo 3. Nesse cenário, emerge uma nova tecnologia: a fabricação de produtos aglomerados, como briquetes de minério de ferro com menor demanda de energia térmica e, portanto, menor consumo de combustível.

Nessa nova tecnologia, a temperatura necessária para o processo produtivo gira em torno de 250 °C, contrastando significativamente com as rotas de aglomeração tradicionais,

que requerem temperaturas de cerca de 1.300 °C. Essa diferença substancial permite uma redução de até 80% das emissões de CO_2 associadas à produção desses aglomerados, contribuindo assim para a redução das emissões de escopo 3 da indústria de mineração. Além disso, essa solução se alinha aos princípios da economia circular, já que a produção de ligantes pode fazer uso da areia proveniente dos rejeitos de mineração.

FIGURA 11. Comparação entre briquetagem, pelotização e sinterização



Fonte: Adaptado de Vale anuncia... (2021).

BOX 11. Caso de aglomerado verde

Vale

Projeto de briquetagem verde de minério de ferro localizado no Complexo de Tubarão (ES) é a primeira unidade desse tipo no mundo. Com tecnologia desenvolvida pela empresa, o briquete é um produto formado por minério de ferro e uma solução tecnológica de aglomerantes aplicável em altos-fornos e fornos de redução direta, que contribuem para a redução de emissões na cadeia produtiva do aço (escopo 3). Com o produto, as usinas geram 10% menos emissões de CO_2 no processo de fabricação do aço. O investimento na nova planta gira em torno de R$ 1,3 bilhão. A produção dos briquetes de minério de ferro é parte da estratégia da empresa de reduzir em 15% suas emissões de escopo 3, relativas à cadeia de valor, até 2035.

A empresa converteu duas usinas de pelotização, em Vitória (ES), para produzir o briquete verde. A capacidade inicial de produção é de cerca de 6 milhões de toneladas por ano. Com investimento total de US$ 182 milhões, a primeira planta entrou em operação em 2023, e a segunda em 2024.

NOVAS TECNOLOGIAS PARA REDUÇÃO DE EMISSÕES DE ESCOPO 3

Um caminho relevante para a descarbonização das indústrias de mineração e siderurgia poderá ser a autorredução com base no uso de fontes de energia de baixo carbono, principalmente de biomassa. Essa abordagem, previamente discutida, oferece à indústria a oportunidade de aproveitar reservas de minérios de baixa qualidade enquanto reduz as emissões de gases de escopo 3. O ferro-gusa é produzido por meio da autorredução, fornecendo um material fundamental para a siderurgia, que pode, então, se concentrar em sua atividade principal de produção de aço, como ilustrado na Figura 10. A diferença é que nesse processo, conhecido como Tecnored, os briquetes são carregados em um forno específico.

Ao viabilizar o uso de minerais de baixa qualidade e o reaproveitamento integral dos resíduos gerados no processo, essa tecnologia promove a eficiência na utilização de recursos naturais e contribui para a mitigação das mudanças climáticas, ao reduzir as emissões de GEEs associadas à extração e processamento de minerais.

Outra rota para redução de emissões de escopo 3 é a adoção de combustíveis de menor intensidade de carbono no transporte marítimo de produtos minerais. Embora não tenha sido totalmente explorada no Seminário de Descarbonização das Indústrias de Base, apresentamos a seguir o caso da Vale.

BOX 12. Caso de fonte de energia de baixo carbono de escopo 3

Vale

O programa Ecoshipping é uma iniciativa de P&D criada pela área de navegação da Vale. Seu objetivo é atender ao desafio de reduzir suas emissões de carbono na navegação. Por meio desse programa, a Vale busca adotar novas tecnologias e renovar sua frota, visando a sustentabilidade e alinhando-se às metas estabelecidas pela Organização Marítima Internacional (OMI).

Uma das ações pioneiras do programa é o projeto de *design* para tanques multicombustíveis. Esse projeto recebeu a aprovação em princípio (*approval in principle* – AIP) da Sociedade Classificadora Det Norske Veritas (DNV). O sistema de tanques multicombustíveis permitirá que as embarcações fretadas pela mineradora sejam adaptadas para armazenar combustíveis alternativos como gás natural liquefeito (GNL), metanol e amônia. Estima-se que a redução de emissões pode variar entre 40% e 80% quando elas forem movidas a metanol e amônia, ou em até 23% no caso do GNL. Além disso, dezenas de *very large ore carriers* (VLOCs) de segunda geração já em operação foram projetados para futura instalação de sistema de GNL.

Juntamente com outras tecnologias de eficiência energética, como velas rotativas e *air lubrication*, o sistema de tanques multicombustíveis contribui para tornar as embarcações mais eficientes e com baixíssimas emissões de carbono. A Vale também investiu em outras inovações, como o uso de energia eólica no maior navio transportador de minérios do mundo.[41]

Por fim, o sucesso de tecnologias de captura, armazenamento e/ou uso de carbono oferece a possibilidade de eliminar completamente as emissões de GEEs.

A indústria de mineração exerce uma influência abrangente sobre toda a cadeia de produção de minerais e metais, por fornecer matérias-primas essenciais para diversos setores industriais. No contexto brasileiro, a indústria mineradora apresenta uma posição estratégica devido a sua riqueza em recursos minerais, seu acesso a fontes de energia renovável e a tecnologia de ponta. Isso a coloca em uma posição privilegiada para liderar os esforços de descarbonização no setor, bem como para apoiar a transição de seus clientes. No entanto, há desafios a serem enfrentados para concretizar plenamente essa oportunidade, que serão abordados mais à frente.

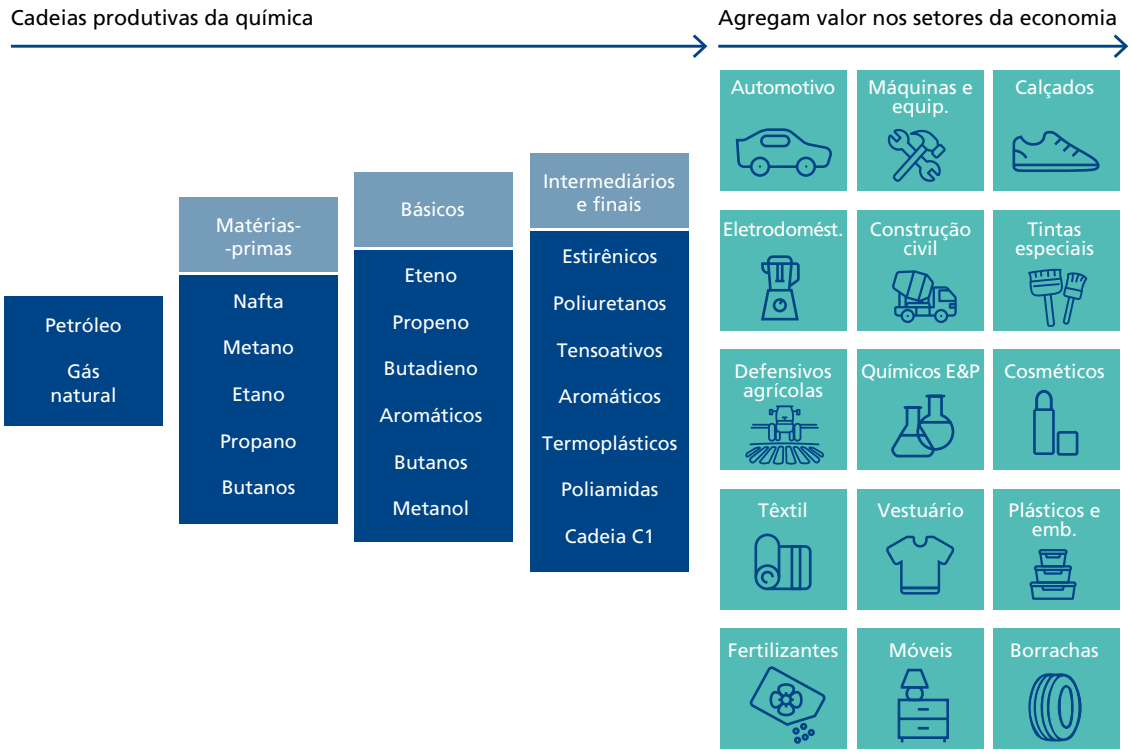
41 Ver Vale avança... (2022).

Indústria química

Diferentemente dos setores de aço e cimento, a indústria química abrange uma grande variedade de processos para criar produtos utilizados todos os dias. Os produtos químicos integram as cadeias produtivas de diversos setores da economia: a partir do petróleo e do gás natural, são produzidas matérias-primas que vão alimentar a primeira geração de produtos químicos básicos, os quais, por sua vez, são empregados na fabricação de uma ampla gama de produtos intermediários e finais.

Esses produtos intermediários e finais são utilizados em diversos setores, como: farmacêutico; de fertilizantes; indústria alimentícia; indústria automobilística; de construção; tecnologia eletrônica; indústria têxtil; e energia renovável.[42] Dessa forma, contribuem para a funcionalidade e inovação em diversos produtos e tecnologias que fazem parte de nosso cotidiano.

FIGURA 12. Cadeia produtiva da indústria petroquímica



Fonte: Apresentação realizada pelo Instituto Aço Brasil em 22.8.23 no Seminário de Descarbonização da Indústria Química no BNDES.

O segmento químico é o segundo maior consumidor tanto de petróleo quanto de gás natural, representando 14% e 8%, respectivamente, da demanda primária global de cada combustível (EPE, 2023a). Sua posição é superada apenas pelo setor de transportes.

42 Produtos químicos são utilizados no desenvolvimento de células solares, baterias de armazenamento de energia e materiais para a geração de energia a partir de fontes renováveis.

Principais processos emissores

No âmbito industrial, o setor químico é o maior consumidor de energia, mas ocupa apenas a terceira posição entre os subsetores industriais em termos de emissões diretas de CO_2. Os combustíveis fósseis são utilizados não apenas para a combustão, a fim de atingir o calor e a pressão necessários para as reações químicas, mas também como insumos ou matérias-primas, sendo convertidos em produto final.

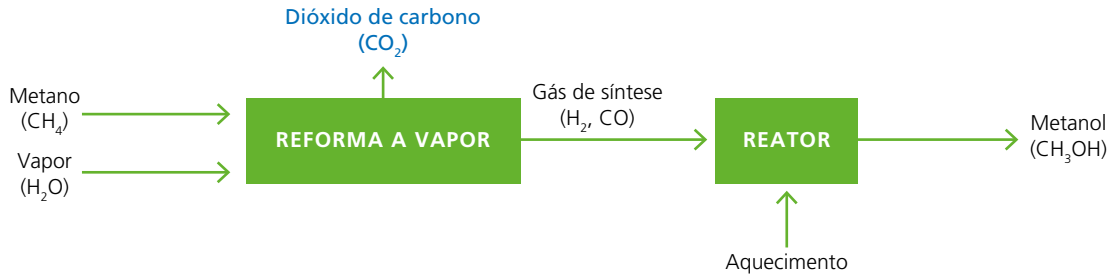
As emissões decorrem tanto da energia consumida nos processos de produção quanto diretamente das reações e transformações químicas dos insumos. De acordo com Gabrielli e outros (2023), a indústria química responde por 5% das emissões globais de GEEs, em comparação com 7% a 8%, respectivamente, para as indústrias de aço e cimento.

No Brasil, em 2020, a indústria química foi responsável por 3,7% das emissões dos processos industriais, sendo 53,2% destas provenientes da produção de amônia.[43] De acordo com a IEA,[44] globalmente, a produção de amônia também é responsável pela maior parcela de emissões, representando 45% das emissões da produção química primária, seguida pela produção de metanol (28%) e de produtos químicos orgânicos de alto valor, como eteno (ou etileno), propileno, benzeno, tolueno e xilenos mistos (27%).

Ainda que o carbono seja uma matéria-prima comum ou subproduto da produção de produtos químicos tanto orgânicos quanto inorgânicos, nesta seção nos ateremos a discutir os orgânicos metanol[45] e eteno, reservando a discussão sobre o processo de produção da amônia para a seção dedicada à indústria de fertilizantes.

METANOL

FIGURA 13. Processo simplificado de produção de metanol



Fonte: Adaptado de Gross (2021).

43 Disponível em: https://seeg.eco.br/dados/. Acesso em: 23 ago. 2023.

44 Disponível em: https://www.iea.org/energy-system/industry/chemicals. Acesso em: 4 set. 2023.

45 Mais de 90% dos produtos químicos orgânicos são derivados de sete produtos químicos primários ou blocos de construção: metanol; as olefinas etileno, propileno e butadieno; e os compostos aromáticos benzeno, tolueno e xileno (American Chemistry Council, 2019).

Atualmente, o metanol é produzido principalmente a partir do gás natural como matéria-prima, que é misturado com vapor de alta pressão e alimenta reatores de reforma a vapor para produzir gás de síntese, uma mistura composta principalmente por hidrogênio e monóxido de carbono. Essa mistura gasosa é então convertida em metanol em temperaturas e pressões elevadas. O processo produtivo é intensivo em energia, necessitando de grandes quantidades de energia térmica para geração de vapor.

No entanto, o gás de síntese pode ser produzido a partir de qualquer material que contenha carbono, incluindo carvão, óleo, resíduos agrícolas/florestais ou resíduos sólidos urbanos. No caso do carvão, é preciso passar por um processo de gaseificação antes de sua utilização para gerar gás de síntese, resultando em um consumo de energia duas vezes maior e em uma intensidade de CO_2 cinco vezes maior do que a produção de gás de síntese a partir de gás natural.

A gaseificação do carvão, a reforma a vapor de metano e o craqueamento a vapor de combustíveis fósseis são os processos mais intensivos em emissões de GEEs do setor químico.

ETENO

O eteno (ou etileno) é o hidrocarboneto primário produzido em maior quantidade no Brasil e um dos principais da cadeia de valor da indústria petroquímica. É utilizado no processo de produção de diversos produtos de uso comum, como polietilenos usado em sacolas e embalagens, o polietileno tereftalato (PET) usado em garrafas e o policloreto de vinila (PVC) de canos e materiais de construção.

Universalmente, é produzido por meio do craqueamento de matérias-primas petroquímicas. A produção de etileno também gera, como substâncias secundárias, propileno, butadieno e compostos aromáticos. O etileno é produzido tradicionalmente pelo craqueamento a vapor do etano, um processo que não gera CO_2 como parte das reações químicas. A principal fonte de emissões de GEEs durante o craqueamento a vapor está relacionada à produção do calor necessário para realizar a quebra das moléculas. O aquecimento é frequentemente obtido pela queima de combustíveis fósseis. Além disso, o eteno é convertido em produtos químicos que geram emissões adicionais de GEEs durante seu ciclo de vida.

Rotas de descarbonização da indústria química

Existem diversas alternativas e abordagens que buscam a redução da intensidade de carbono na indústria química, entre as quais destacam-se:

QUADRO 4. Rotas para descarbonização na indústria de química

Rotas de curto e médio prazo	i. Esforço consolidado de abatimento de N_2O; ii. Eficiência energética e transição para fontes de energia renováveis, eletrificação e biomassa em caldeiras; iii. Uso de matérias-primas renováveis – etanol e biocombustíveis; e
Rotas baseadas em tecnologias disruptivas	iv. Avanço no desenvolvimento de tecnologias inovadoras, hidrogênio verde e CCUS.

Fonte: Elaboração própria.

REDUÇÃO DE EMISSÃO DE N_2O

Nos últimos anos, a adoção de processos direcionados à redução da emissão de óxido nitroso (N_2O) tem impulsionado a diminuição das emissões de GEEs. Um exemplo significativo destacado pela Rhodia durante o Seminário de Descarbonização da Indústria Química diz respeito à diminuição das emissões de óxido nitroso em suas operações.

Globalmente, os gases que contribuem para o efeito estufa são o dióxido de carbono, o metano, o óxido nitroso e os gases fluorados. O óxido nitroso (N_2O) é um GEE com potencial de aquecimento global 265 vezes maior do que o CO_2. Esse gás pode ser derivado de várias operações na indústria química, especialmente aquelas que envolvem o uso e manuseio de compostos nitrogenados, como a produção de ácido nítrico (HNO_3) e da adiponitrila ($C_6H_8N_2$) em reações catalíticas específicas.

O caso apresentado no Box 13 faz parte do escopo do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo.[46] A instalação permitiu a significativa redução das emissões de N_2O e gerou receitas para a empresa por meio de créditos de carbono atrelados ao Protocolo de Quioto, que deixaram de existir no encerramento do programa no final de 2012.

46 Uma das inovações do Protocolo de Quioto (1997) foi o acordo de cooperação entre os países para a mitigação das mudanças climáticas. Foram criados três mecanismos de flexibilização, mas apenas o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo permitiu a participação de países em desenvolvimento. Esse mecanismo foi um acordo, no âmbito do qual os países desenvolvidos poderiam implementar projetos que promovessem o desenvolvimento sustentável nos países em desenvolvimento, contribuindo para a redução de suas emissões de GEEs. A execução dessas iniciativas geraria créditos de redução para os países desenvolvidos.

BOX 13. Caso de redução de emissão de N_2O

Rhodia Solvay

O projeto Angela (Abatement N_2O Gas Emissions Latin America) foi implantado em 2006 no complexo industrial da Rhodia, em Paulínia (SP), com a instalação de unidade de abatimento de N_2O por destruição térmica. O N_2O gerado nessa fábrica era um subproduto da fabricação de ácido adípico, principal componente do náilon. A partir de 2019, o nível de eficiência da unidade, que era 98%, passou a 99,99% graças a investimentos em projetos de melhoria e confiabilidade.

O projeto Paganini foi implantado pela Rhodia, também em 2006, para redução de emissões de N_2O por meio da instalação de catalisadores no reator da unidade de produção de ácido nítrico. O ácido nítrico é um composto inorgânico usado principalmente na fabricação de fertilizantes sintéticos.

Os dois projetos da Rhodia reduzem a emissão de 4,5 milhões de toneladas de CO2e por ano, o que corresponde às emissões de 1 milhão de carros rodando durante um ano.

Energia renovável: a Rhodia adquire energia elétrica renovável gerada a partir da queima de bagaço de cana da Unidade de Cogeração de Energia Elétrica de Brotas.

Considerando o ano base da NDC do Brasil no Acordo de Paris (2005), a Rhodia já reduziu cerca de 95% das emissões de GEEs de suas emissões diretas e indiretas associadas à compra de eletricidade (emissões de escopos 1 e 2, respectivamente).

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E TRANSIÇÃO PARA FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS

A busca por processos mais eficientes e o investimento em tecnologias que reduzam o consumo de energia são essenciais para minimizar as emissões de GEEs. Devido a sua relativa simplicidade, essas iniciativas podem ser executadas sem gastos significativos de capital.

A transição para fontes de energia renováveis permite que o setor aproveite os avanços em eletricidade com baixas emissões de carbono, tanto da rede elétrica quanto de fontes de geração local, em vez de queimar combustíveis fósseis. Alguns aspectos da eletrificação na indústria química incluem processos eletroquímicos para realizar reações químicas, substituindo métodos tradicionais que dependem de combustíveis fósseis, e o uso de energia elétrica para aquecimento e potência.

Segundo dados do United States Department of Energy (2022, p. 72), cerca de 60% da demanda de calor do processo encontra-se na faixa de baixa temperatura (nas categorias <80°C e entre 80°C e 150°C), representando a melhor oportunidade para diversas tecnologias atuais (por exemplo, eletrificação, aquecimento solar, calor de reatores nucleares e substituição de geradores de vapor distribuídos). Uma parcela adicional de

15% do calor do processo situa-se na faixa de temperatura média (150°C a 300°C), para a qual tecnologias emergentes como bombas de calor de alta temperatura demonstram capacidade de suprimento. Apenas 2% do calor do processo está na faixa de 300°C a 550°C, mas uma parcela adicional de 24% está na faixa de 550°C a 1.100°C. Nenhuma tecnologia madura pode gerar essa última faixa de nível de calor sem combustão.[47]

No contexto brasileiro, em que a matriz elétrica já conta com uma parcela significativa de fontes renováveis, a potencial transição para energias limpas na indústria química pode ser facilitada, impulsionando a competitividade do setor enquanto reduz seu impacto ambiental.

BOX 14. Casos de eficiência energética e fontes de energia renovável

Kurita

Engenharia para tratamento de águas industriais: a tecnologia Dropwise Condensation é capaz de assegurar ganhos na transferência de calor que utiliza vapor como fonte de energia indireta para diversas aplicações industriais. Um produto hidrofóbico é dosado continuamente na linha de vapor diante do dispositivo alvo, criando uma película repelente à água nas superfícies. Aumentar a repelência à água melhora a eficiência da transferência de calor, o que ajuda a otimizar a produtividade. Ao mesmo tempo, o consumo de vapor é reduzido, levando a um menor consumo de combustível e à redução dos custos de água e energia.

Assim, a tecnologia possibilita a redução do consumo de energia em curto período, com investimentos relativamente baixos.

Braskem

Projeto de modernização do sistema elétrico do Polo Petroquímico da Região do ABC (SP): o modelo de negócios é de cogeração, sendo o investimento e a implementação realizados pela Siemens Energy com a assinatura, pela Braskem, de um contrato de aquisição de energia elétrica e vapor válido por quinze anos. A modernização da unidade prevê a troca de turbinas à base de vapor por motores elétricos de alto rendimento, suportados por uma nova planta de cogeração de energia alimentada por gás residual da produção petroquímica. Essa mudança estrutural permitirá que o processo produtivo da unidade industrial se torne energeticamente mais eficiente. Com essa modernização, a Braskem estima uma redução do consumo de energia equivalente ao de uma cidade com um milhão de habitantes (Braskem..., 2019).

(continua)

47 Essa última faixa pode ser acessada por reatores nucleares avançados, incluindo reatores de gás de alta temperatura (HTGR) e reatores de temperatura muito alta (VHTR) disponíveis a curto prazo, assim como reatores de sal fundido. Outras tecnologias capazes de atingir essa faixa incluem eletrólise do hidrogênio e aquecimento elétrico (United States Department of Energy, 2022, p. 72).

(continuação)

A parceria foi formalizada em 2018, seguida por construção e implementação entre 2019 e 2020, enquanto a motorização parcial ocorreu em 2021. No ano de 2022, deu-se início à cogeração, resultando em benefícios como a redução de aproximadamente 35 mil toneladas/ano de CO2e e a melhoria na confiabilidade elétrica. Com a conclusão da motorização em 2023, estimam-se ganhos na redução de emissões de GEEs de aproximadamente 100 mil toneladas/ano de CO2e, diminuindo o consumo energético, em 7,3%, e o consumo de água, em 11%, nas instalações.

Em 2018, a Braskem deu início a uma sequência de acordos de longo prazo para a compra de energia renovável. Os acordos representam 40% da energia comprada pela Braskem no Brasil. Ao longo da vigência dos contratos, será evitada a emissão de 3,3 milhões de toneladas de CO2e. Esses acordos de longo prazo viabilizam a construção de novos empreendimentos com capacidade instalada equivalente a mais de 500 MW, contribuindo para a expansão do sistema elétrico brasileiro.

Adicionalmente, a Braskem adquiriu participação acionária minoritária nas sociedades de propósito específico geradoras de energia eólica Santa Amélia, Santo Abelardo e Santo Artur, do grupo Casa dos Ventos.

Produção de energia térmica com o uso de vapor à base de biomassa

Braskem e Veolia assinaram um acordo de R$ 400 milhões em investimento para produzir energia renovável com o uso de vapor a partir de biomassa de eucalipto em Alagoas. O projeto substituirá 215.000 m³/d de gás natural e gerará 900 mil toneladas de vapor de biomassa por ano, em um período de vinte anos, o que significará a redução de emissões de aproximadamente 150 mil toneladas de CO_2 por ano. O projeto teve início em 2018, quando as empresas iniciaram os estudos da biomassa.

USO DE MATÉRIAS-PRIMAS RENOVÁVEIS – ETANOL E BIOCOMBUSTÍVEIS

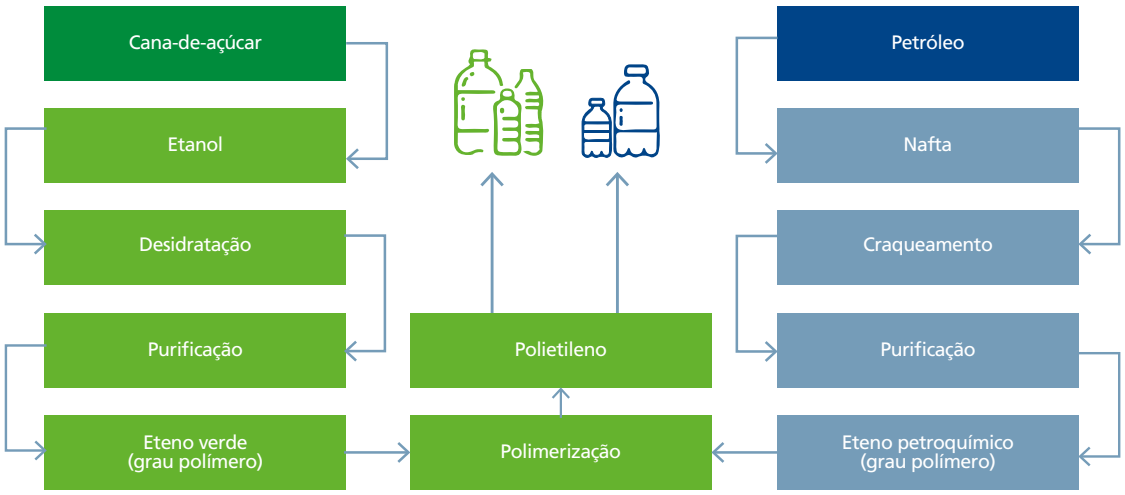
Eteno verde

O eteno é um componente crucial na produção de petroquímicos. Obtido a partir de fontes renováveis, é unidade fundamental para a produção renovável de outras resinas termoplásticas e solventes, além do polietileno (PE). A partir do eteno é possível produzir, monoetilenoglicol (matéria-prima para produção do PET), etileno vinil acetato (EVA),[48] embalagens de comida e industriais, filmes, fios, cabos, diversos tipos de solventes, entre outros produtos (Mello; Soto; Viveiro, 2020).

48 O EVA é um copolímero amplamente utilizado em uma variedade de aplicações devido a suas propriedades únicas e versáteis.

O bioetileno é obtido por meio da desidratação catalítica do etanol, que perde uma molécula de água para se tornar o etileno. Essa rota é competitiva apenas em regiões nas quais o etanol pode ser produzido a um custo competitivo, o que está diretamente ligado à disponibilidade local de matérias-primas de base biológica. O Brasil, que produz grandes volumes de etanol a partir da fermentação de cana-de-açúcar, tem 50% da capacidade mundial de produção de bioetanol (Cebds, 2023, p. 73).

FIGURA 14. Comparação do processo produtivo do eteno verde e do eteno petroquímico



Fonte: Adaptado de Cebds (2023, p. 74).

BOX 15. Caso de matérias-primas renováveis

Braskem

Projeto de biopolímeros a partir de etanol: em 2010, a Braskem estabeleceu a primeira planta industrial de eteno verde em escala, localizada em Triunfo (RS), com capacidade produtiva de 200 mil toneladas anuais. O investimento de US$ 250 milhões contou com financiamento do BNDES.

A tecnologia empregada pela Braskem utiliza o etanol proveniente da cana-de-açúcar, no lugar da nafta ou gás natural, em suas unidades de *crackers*, para produção de eteno, que é posteriormente utilizado em suas plantas de segunda geração para produção de polietileno (PE), denominado I'm green™, e EVA Verde, atendendo a uma ampla variedade de clientes finais em diversos setores.

(continua)

(continuação)

Os biopolímeros são uma importante solução para a indústria petroquímica rumo à neutralidade carbônica, pois a matéria-prima utilizada para sua produção contém carbono de origem biogênica, ou seja, carbono que é removido da atmosfera durante o processo de fotossíntese de vegetais. O carbono biogênico é o carbono que está naturalmente presente em organismos vivos, ao contrário do carbono fóssil, que é liberado pela queima de combustíveis fósseis. Por reter as moléculas de carbono biogênico por anos, os biopolímeros podem ser considerados estoques de longo prazo de carbono biogênico. Cada tonelada produzida de PE Verde captura emissões na ordem de 3,09 tCO2e ao longo de seu ciclo de vida – nessa mesma abordagem, o PE convencional de fonte fóssil emite cerca de 1,8 tCO2e.

Em 2023, a companhia concluiu o projeto de expansão de 30% da capacidade atual de eteno verde no polo petroquímico de Triunfo para 260 mil t/ano, com um investimento de US$ 87 milhões.

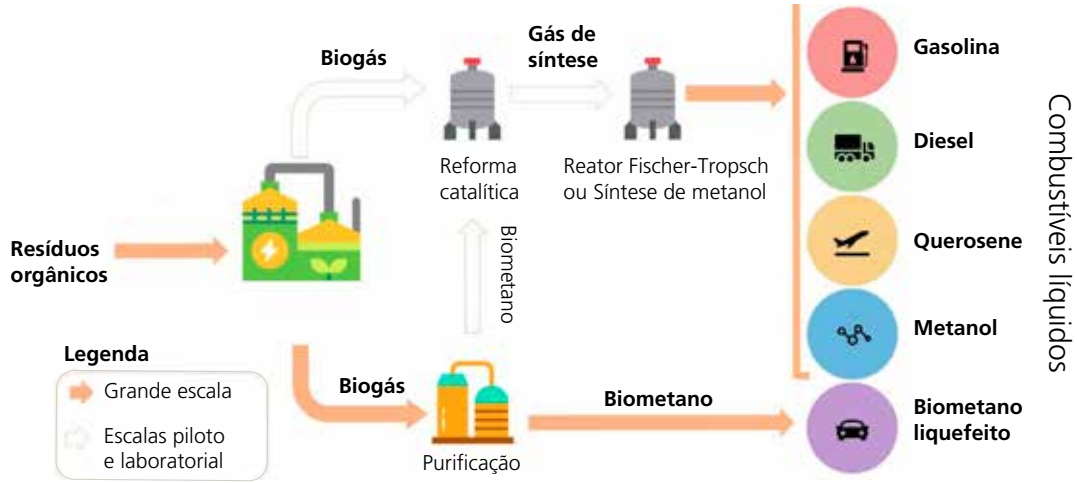
Biometano

O Brasil tem considerável potencial para a produção de biocombustíveis em função da abundância de recursos naturais e orgânicos e expertise na produção agrícola e florestal, além de políticas favoráveis e longa tradição.

A substituição do gás natural pelo biometano pode contribuir para a redução da intensidade de carbono na indústria química. A gaseificação de biomassa possibilita a produção de energia térmica[49] e de diversos produtos bioquímicos, como o biometanol. O metanol é um dos compostos químicos mais usados atualmente, em diversos setores, como de transporte, indústria e energia. As propriedades do biometanol produzido via gaseificação de biomassa não diferem, em composição química, do metanol produzido com matéria-prima não renovável, como petróleo, carvão e gás natural (Eichler *et al.*, 2015).

49 Vide caso de fonte de energia renovável da Braskem e Veolia citado na subseção anterior.

FIGURA 15. Produção de combustíveis líquidos a partir do biogás e do biometano



Fonte: Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial – Unido (2022).

Os casos mencionados de bioeteno e biometano evidenciam que a reutilização de biomassa e resíduos, em conjunto com os procedimentos de biomanufatura, podem ser uma contribuição valiosa para as soluções de descarbonização. Progressos na pesquisa em biomanufatura têm acelerado o desenvolvimento de rotas potencialmente viáveis.

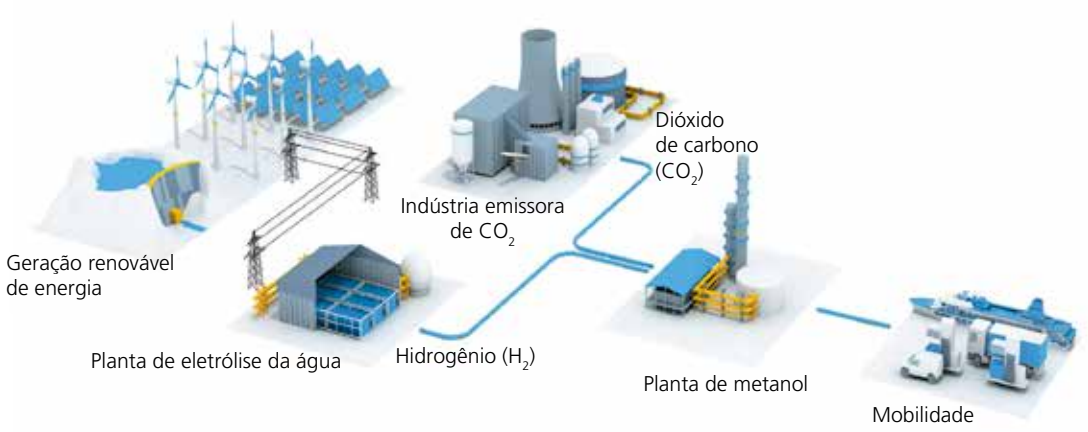
AVANÇO NO DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIAS INOVADORAS

Outras alavancas para o processo de descarbonização são o uso do hidrogênio verde e do carbono emitido nas operações.

O hidrogênio está relacionado a diversas aplicações e processos químicos fundamentais, como a produção de amônia e a síntese do metanol. Além disso, de forma indireta (por meio da conversão de metanol em olefinas/aromáticas), contribui para a produção de matérias-primas essenciais para uma ampla gama de plásticos e outros produtos químicos.

Uma opção de descarbonização que vem sendo estudada é a captura do CO_2 emitido nos processos industriais para uso como matéria-prima em conjunto com o hidrogênio verde produzido por meio de eletrólise alimentada por eletricidade renovável. Nessa operação, são gerados combustíveis sintéticos de hidrocarbonetos com densidades energéticas comparáveis a *diesel*, gasolina e querosene de aviação, como o metanol de baixo carbono.

FIGURA 16. Produção de metanol renovável



Fonte: Adaptado de Methanol Institute (2018).

Dada a complexidade e heterogeneidade, a necessidade de alto grau de capital investido, a integração exigida e as interdependências complexas na cadeia de suprimentos, a transição para um futuro com baixas emissões na indústria química precisará ser buscada por meio de vários caminhos paralelos, incluindo os pilares de descarbonização descritos neste trabalho. Os desafios relacionados à descarbonização das indústrias de base brasileira, particularmente da indústria química, serão abordados na próxima seção.

Indústria de fertilizantes

Os fertilizantes são fundamentais para a atividade agrícola, pois fornecem nutrientes essenciais para as plantas e, consequentemente, aumentam a produtividade por hectare cultivado. Como resultado, os fertilizantes contribuem para a segurança alimentar, a cadeia de biocombustíveis e o atendimento à demanda de uma série de outras matérias-primas agropecuárias, gerando benefícios econômicos e sociais.

Os fertilizantes são classificados quanto à natureza de sua composição (mineral ou orgânica, natural ou sintética), à quantidade de nutrientes que o compõem e ao tipo de macronutriente primário que o caracteriza.

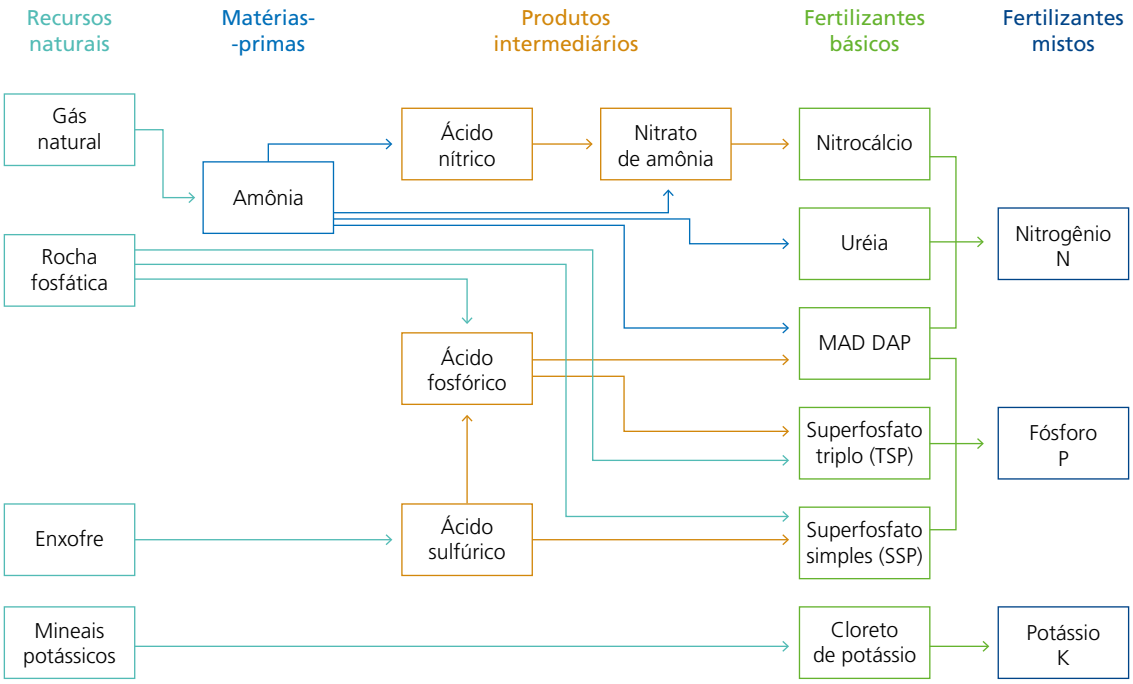
Destacam-se como macronutrientes primários: o nitrogênio (N), o fósforo (P) e o potássio (K), os quais são combinados em diferentes proporções de acordo com as necessidades de aplicação no solo. Assim, são conhecidos como fórmulas NPK.

Atualmente, os maiores complexos industriais brasileiros concentram seus esforços na produção de fertilizantes fosfatados e nitrogenados. A amônia assume um papel fundamental nesse cenário, servindo como base para a síntese de fertilizantes nitrogenados. De

maneira análoga, ácido sulfúrico e ácido nítrico são empregados em reações específicas para a fabricação de fertilizantes fosfatados e nitrogenados, respectivamente.[50]

A Figura 17 ilustra a cadeia produtiva de fertilizantes, começando com recursos naturais como gás natural (GN), rocha fosfática, enxofre e minerais potássicos. A partir deles, são produzidas matérias-primas essenciais, como a amônia, e importantes compostos químicos, como ácido nítrico, fosfórico e sulfúrico. Tais componentes são fundamentais para a fabricação de diversos tipos de fertilizantes. Entre os fertilizantes básicos produzidos, estão a ureia, o fosfato monoamônico (MAP), o fosfato diamônico (DAP), o superfosfato triplo (TSP), o superfosfato simples (SSP) e o cloreto de potássio (KCL). Além disso, a combinação desses produtos resulta na formação de fertilizantes mistos, como os NPK. Esse fluxo de produção destaca a interligação entre os recursos naturais e os fertilizantes utilizados na agricultura.

FIGURA 17. Processo produtivo simplificado da indústria de fertilizantes



Fonte: Elaboração própria com base em Dias e Fernandes (2006).

50 Os fertilizantes fosfatados, em sua maioria, têm como matéria-prima o enxofre e a rocha fosfática, a qual é extraída pela mineração e tratada com ácido sulfúrico de modo a formar o fertilizante desejado.
Ao contrário dos fertilizantes fosfatados, os insumos potássicos não precisam ser submetidos a processos de ácidos fortes ou ao tratamento com calor. Após a extração, o minério é processado para separar o potássio de outros minerais indesejados, resultando em cloreto de potássio de alta pureza. Esse cloreto de potássio é então granulado e tratado para criar os grânulos de fertilizantes potássicos que são utilizados na agricultura para fornecer nutrientes essenciais às plantas.
Os fertilizantes nitrogenados têm como componente principal o nitrogênio e se originam da fabricação de amônia anidra, gás formado pela reação do gás de síntese (mistura de nitrogênio, proveniente do ar, e hidrogênio, proveniente do gás natural, da nafta ou de derivados do petróleo, em uma relação 1:3) (Fertilizantes..., 2020).

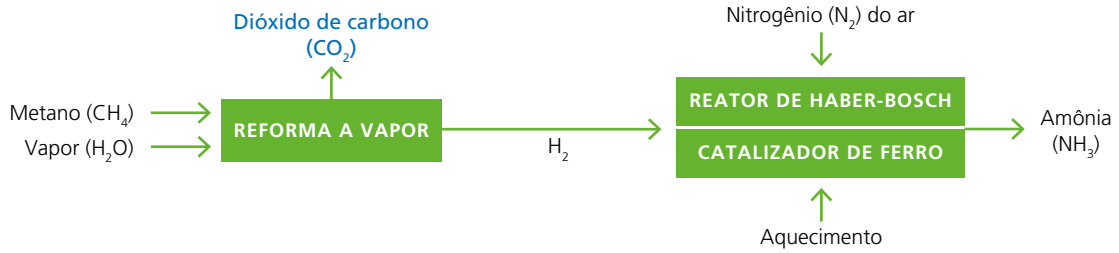
Principais processos emissores

Na indústria de fertilizantes, a amônia e o óxido nitroso são considerados importantes fontes de emissão de GEEs. Ambos estão relacionados, principalmente, aos processos de produção de fertilizantes nitrogenados, cruciais para fornecer nitrogênio aos cultivos agrícolas. Embora a amônia seja um precursor importante para o óxido nitroso, os dois gases são distintos em termos de impacto nas mudanças climáticas.

A amônia produzida a partir de combustíveis fósseis é o composto que demanda a maior quantidade de energia e apresenta uma elevada taxa de emissão de GEEs durante seu processo produtivo. Uma quantidade significativa de dióxido de carbono é liberada pela reforma a vapor de gás natural. Em seguida, o hidrogênio reage com o nitrogênio separado do ar para produzir amônia a partir de hidrogênio no método de Haber-Bosch. Esse processo requer uma considerável quantidade de energia[51] para atingir temperaturas de até 500°C e altas pressões, podendo chegar a 20 MPa.

Dessa forma, o GN desempenha um papel crucial no processo, servindo tanto como matéria-prima quanto fonte de calor. Em geral, desde as matérias-primas de hidrocarbonetos até a síntese de amônia, são liberadas quantidades significativas de CO_2. Assim, a produção de uma tonelada de amônia gera aproximadamente 2,4 t de CO_2 (World Economic Forum, 2023).

FIGURA 18. Processo simplificado de produção de amônia



Fonte: Adaptado de Gross (2021).

O óxido nitroso, por sua vez, é uma das substâncias que mais contribuem para o efeito estufa, junto com o CO_2, o metano e os gases fluorados. De acordo com o Greenhouse Gas Protocol (2016), seu potencial de aquecimento global é 265 vezes maior do que o do CO_2, como mencionado. Esse gás pode ser derivado de diversas operações da indústria química, especialmente daquelas que envolvem uso e manuseio de compostos nitrogenados, como a produção de ácido nítrico e da adiponitrila em reações catalíticas específicas.

51 A própria energia necessária para produzir vapor d'água e manter as altas temperaturas e pressões necessárias ao processo Haber-Bosch requer queima de gás natural e, por conseguinte, relevantes emissões de CO_2.

A produção de ácido nítrico contribui para as emissões de GEEs principalmente devido ao processo utilizado para sintetizá-lo, conhecido como o processo de Ostwald,[52] que envolve a oxidação de amônia para formar o ácido nítrico sob altas temperaturas. Em muitas instalações, essa energia é fornecida pela queima de combustíveis fósseis, como gás natural ou óleo. Essa combustão libera dióxido de carbono. Já as emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) ocorrem durante a síntese do ácido nítrico.

Esse é um esboço geral do processo. As condições específicas, catalisadores e etapas intermediárias podem variar dependendo da implementação específica em uma planta industrial. Catalisadores podem ajudar a controlar a formação específica de óxidos de nitrogênio e, em alguns casos, promover a conversão eficiente para produtos desejados.

Rotas de descarbonização da indústria de fertilizantes

As rotas de descarbonização da indústria de fertilizantes têm muito em comum com as rotas da indústria química, uma vez que compartilham processos, técnicas e matérias-primas. O Quadro 5 apresenta os principais pilares que respondem pela redução das emissões do setor.

QUADRO 5. Rotas para descarbonização na indústria de fertilizantes

Rotas de curto e médio prazo	i. Catalisadores de N_2O; ii. Eficiência energética e fontes de energia renováveis e de baixo carbono; iii. Uso de matérias-primas renováveis (biometano para amônia e nitrogenados); e
Rotas baseadas em tecnologias disruptivas	iv. Avanço no desenvolvimento de tecnologias inovadoras (hidrogênio verde) e CCUS.

Fonte: Elaboração própria.

CATALISADORES DE N_2O

A produção de fertilizantes nitrogenados está associada à emissão de óxido nitroso, potente gás de efeito estufa. As emissões de N_2O estão relacionadas a várias etapas do ciclo de vida dos fertilizantes nitrogenados, incluindo a produção, a aplicação e a subsequente conversão no solo.

Em particular, o óxido nitroso é gerado como subproduto da produção do ácido nítrico. Nesse processo, a amônia reage com o oxigênio para formar óxidos de nitrogênio, que posteriormente são convertidos em ácido nítrico (HNO_3), gerando o óxido nitroso (N_2O) como subproduto. Em seguida, o ácido nítrico reage com amônia (NH_3) para formar nitrato de amônio (NH_4NO_3), que é um sal que contém nitrogênio disponível para as plantas.

---

52 Equação global simplificada para a reação:
$4NH_3 + 5\ O_2 \rightarrow 4NO + 6H_2O$
$2NO + 1/2\ O_2 \rightarrow 2NO_2$
$3NO_2 + H_2O \rightarrow 2HNO_3 + NO$

BOX 16. Caso de redução de emissão de N_2O

Yara Fertilizantes

Entre 2005 e 2019, a empresa logrou reduzir em cerca de 45% suas emissões de GEEs, com a instalação de catalisadores para abatimento de N_2O nas plantas de ácido nítrico. Os catalisadores são usados no início do processo, dentro do reator de oxidação de amônia. O método catalítico criado pela empresa reduz a liberação de óxido nitroso na atmosfera, quebrando as moléculas do gás. Dessa maneira, o gás poluente se divide em moléculas de oxigênio e nitrogênio antes de ser liberado na atmosfera, o que não oferece impacto negativo para o meio ambiente.

No Brasil, as plantas de Cubatão (SP), responsáveis pela produção da linha de fertilizantes nitrogenados da empresa, já estão operando com os catalisadores como parte das metas de sustentabilidade. Cubatão 1, por exemplo, já está próxima de concluir a implementação dos projetos de redução de emissão de gases poluentes. Isso permitiu uma queda aproximada de 84 mil toneladas de emissão de CO2e no último ano.

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E TRANSIÇÃO PARA FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS E DE BAIXO CARBONO

De maneira análoga a outros setores, especialmente à indústria química, a implementação de medidas de eficiência energética, como otimização de processos e atualização de equipamentos, aliada à transição para fontes de energia renovável – como solar, eólica e hidrelétrica –, pode consideravelmente aprimorar a pegada de carbono da indústria de fertilizantes. A melhoria na eficiência das etapas produtivas reduzirá o consumo de energia, ao passo que a adoção de fontes renováveis diminuirá a dependência de combustíveis fósseis, promovendo uma produção mais sustentável, em consonância com os objetivos de descarbonização.

BOX 17. Casos de eficiência energética e de fontes de energia renovável

Mosaic Fertilizantes

Cogeração em fábricas de ácido sulfúrico: com o intuito de reduzir a dependência energética, a Mosaic direciona o vapor resultante do resfriamento dos gases do processo de produção de ácido sulfúrico para turbinas destinadas à geração de energia. O projeto Real Time Steam Balance 100 (RTSB 100) busca melhorar a eficiência das operações, reaproveitando este vapor para gerar energia elétrica, água condensada e calor, que são empregados em diferentes etapas da produção. Com essa iniciativa, a empresa estima uma economia de R$ 11 milhões por ano, além da redução da captação de água dos recursos naturais em 30 mil m³ por ano, a redução de emissões de GEEs em 8,7 mil toneladas por ano e a redução da necessidade de uso de combustíveis.

No seminário, a empresa destacou dois projetos focados em eficiência energética. O primeiro projeto visa substituir os turbogeradores, com o objetivo de aumentar a autossuficiência energética nos sítios de Araxá (MG), Uberaba (MG) e Cajati (SP) de 40% para 60%. O segundo projeto concentra-se na automação do processo de balanço de vapor no Complexo Industrial de Uberaba.

Yara Fertilizantes

Entre as iniciativas em destaque para a unidade de Cubatão (SP) estão a implementação de projetos de eficiência energética e a aquisição de energia renovável.

Mineração Morro Verde

Integração energética plena para obter a energia mais limpa do *grid* e projeto de miniusina solar.

BIOMETANO PARA PRODUÇÃO DE AMÔNIA DE BAIXO CARBONO

O Brasil apresenta um elevado potencial para a produção de biogás, devido a sua importante produção agropecuária e à abundância de resíduos orgânicos associados a essas atividades. A conversão desses resíduos em biogás, passível de ser purificado para produzir biometano, é uma abordagem promissora na produção de amônia de baixo carbono.

O biometano, que é intercambiável com o gás natural e não demanda alterações no processo produtivo, assume o papel de fonte renovável de hidrogênio, em substituição ao GN de origem fóssil, na produção de amônia. Essa abordagem pode contribuir para a redução da pegada de carbono associada ao produto final.

Essa tecnologia é considerada madura e, portanto, representa um pilar para a descarbonização a curto prazo, devido a sua capacidade de ser prontamente implementada em escala industrial. No entanto, não promove a descarbonização completa, uma vez que, no processo de reforma a vapor, o biometano é convertido não só em hidrogênio, mas também em dióxido de carbono.

Portanto, embora o uso de biometano reduza a pegada de carbono em comparação com o gás natural, ainda pode haver emissões de CO_2 associadas à produção de hidrogênio. A redução das emissões dependerá da eficiência do processo e das tecnologias empregadas para minimizá-las.

BOX 18. Caso de biogás e biometano

Yara Fertilizantes

O projeto de produção de amônia com menor emissão de carbono tem como base o biometano fornecido pela Raízen, produzido a partir de resíduos orgânicos derivados de sua usina de açúcar e etanol. O insumo será disponibilizado em escala comercial na rede de distribuição (*grid*), com fácil acesso para o complexo da Yara, em Cubatão (SP), e substituirá o gás natural na produção de amônia.

A Yara Fertilizantes planeja implementar a transição para o biometano gradualmente, começando com a substituição de 3% do gás natural utilizado, e tem como meta atingir a marca de 100% de biometano até 2030. O processo de transição teve início previsto para o primeiro semestre de 2024.

De acordo com a empresa, esse enfoque tem o potencial de reduzir as emissões na produção de amônia em, no mínimo, 80%, e será implementado a partir de 2024.

Mineração Morro Verde

Iniciativa visando a implementação de uma planta de amônia verde, com capacidade anual de 50 mil toneladas, alinhada com a agenda de descarbonização tanto no setor de fertilizantes quanto no de energia.

HIDROGÊNIO VERDE/AMÔNIA VERDE

A transição da rota convencional de produção da amônia – ou seja, do processo Haber-Bosch a partir de gás natural – para um processo que utilize hidrogênio produzido a partir de energia limpa, oferece uma contribuição substancial para a descarbonização da indústria.

A amônia verde é produzida utilizando hidrogênio verde como matéria-prima. O hidrogênio verde é obtido por meio da eletrólise da água, utilizando eletricidade gerada a partir de fontes renováveis, como energia solar ou eólica. Esse processo de eletrólise quebra a molécula de água (H_2O) em hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2), sem a geração de emissões de carbono.

O hidrogênio verde, então, é combinado com nitrogênio (N_2) em um processo conhecido como síntese de amônia. A reação química básica para a produção de amônia (NH_3) é:

$3H_2 + N_2 \rightarrow 2NH_3$

Entretanto, a tecnologia de amônia verde ainda está em desenvolvimento. Sua viabilidade e escalabilidade dependem de vários fatores, incluindo avanços em processos de produção, eficiência energética, custos de implementação e infraestrutura. Pesquisas em outras tecnologias sustentáveis para substituir ou melhorar o processo Haber-Bosch na síntese de amônia também estão em andamento.

Além dos quatro pilares de descarbonização previamente mencionados, diversas iniciativas colaboram para o avanço nesse caminho sustentável. Entre elas, destaca-se o uso racional de fertilizantes, que implica ajustar as quantidades aplicadas de acordo com as necessidades reais das culturas. Essa abordagem não apenas promove a eficiência no uso de insumos, como contribui para a redução das emissões associadas à produção e aplicação de fertilizantes.

Outra estratégia relevante é a adoção de fertilizantes de liberação controlada, visando evitar perdas por evaporação ou lixiviação. Essa técnica otimiza a absorção de nutrientes pelas plantas e minimiza o impacto ambiental. Além disso, a mescla com organominerais representa uma prática sustentável, permitindo o reaproveitamento de resíduos gerados no agronegócio brasileiro. A introdução de matéria orgânica no solo por meio desses organominerais beneficia a saúde do solo e contribui para a mitigação do impacto ambiental associado ao descarte desses resíduos.

Complementando essas abordagens, o uso de condicionadores de solo ganha destaque a partir de seus resultados em termos de contribuições para a melhoria da produtividade do solo. Esse benefício potencial pode resultar em uma demanda reduzida por fertilizantes convencionais, como os que contêm NPK. Assim, ao integrar essas práticas no manejo agrícola, é possível avançar significativamente na busca por sistemas de produção mais sustentáveis, alinhados aos objetivos de descarbonização.

Indústria de base florestal

Os produtos provenientes da indústria de base florestal têm função relevante no cotidiano, sendo utilizados em artigos de higiene, embalagens, tecidos, papéis, pisos laminados, móveis, cápsulas de remédios, produtos energéticos, aditivos alimentares, entre outros. Recentemente, em alguns países[53], a indústria de base florestal tem explorado novas oportunidades de negócios, por meio do modelo de biorrefinarias que seriam capazes de produzir biocombustíveis de segunda geração e biomateriais, em substituição aos combustíveis e insumos fósseis.

A indústria de base florestal é composta por duas atividades distintas: a atividade florestal e a atividade industrial, com padrões distintos de emissões de GEEs.

A atividade florestal que atende integralmente à demanda da indústria é responsável por remoção e estoque de carbono, resultando em emissões negativas. A floresta cultivada, por sequestrar carbono da atmosfera, pode ser considerada como um sumidouro de carbono. O estoque é formado durante a fase de crescimento, em que há remoção de carbono da atmosfera. A cada ciclo de colheita, seguido de plantio ou rebrota, esse estoque é renovado e tende a aumentar com o crescimento da área e/ou produtividade das árvores. Por isso, é necessário garantir novos ciclos para dar continuidade ao processo de estocagem.

A atividade industrial focaliza a transformação da madeira proveniente de florestas plantadas por meio de processos de refino, com um elevado consumo de energia e transformações químicas que resultam na concentração das emissões de GEEs do setor.

Segundo especialistas, no balanço entre emissões e remoções das atividades industriais e florestais, o setor tende a remover mais que emitir. De acordo com a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), as florestas plantadas para fins industriais no Brasil tinham estocados 1,82 bilhão de toneladas de CO2e, o que representaria cerca de 80% das emissões nacionais em 2023 (IBÁ, 2023, p. 55).

TABELA 4. Balanço de emissões e remoções em tCO2e

	ATIVIDADE FLORESTAIS REMOÇÕES	ATIVIDADES INDUSTRIAIS EMISSÕES ESCOPO 1, 2 E 3	SALDO POSITIVO DE REMOÇÕES
ARAUCO (2021)	6.700.000	4.500.000	**2.200.000**
BRACELL (2021)	5.970.852	653.549	**5.334.303**
IRANI (2021)	108.324	66.728	**41.596**
KLABIN (2021)	13.123.000	11.166.000	**1.956.000**
SUZANO (2021)	48.709.098	39.812.840	**8.896.257**

Fonte: Apresentação realizada pela IBÁ em 19.9.23 no Seminário de Descarbonização da Indústria de Base Florestal no BNDES.

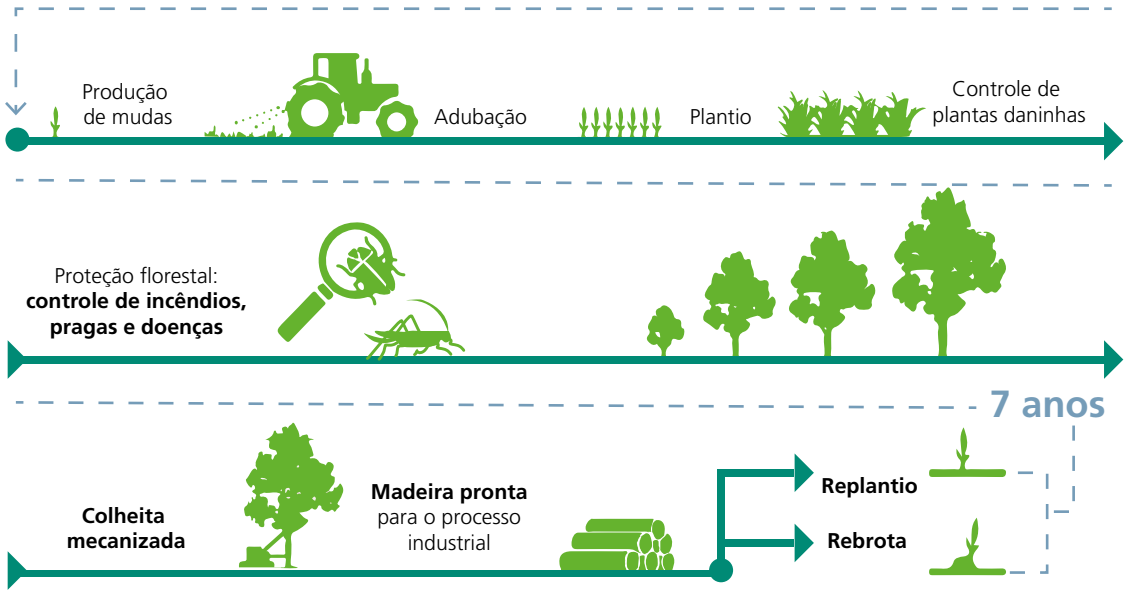
53 Como Brasil, EUA, Suécia, Finlândia, Alemanha e Canadá.

Principais processos emissores

A produção de celulose e papel representa a principal destinação das florestas plantadas para uso industrial no Brasil. Seus processos são notadamente intensivos em energia. Globalmente, essa indústria ocupa a quarta posição como maior consumidora de energia industrial. No contexto brasileiro, conforme dados da EPE (2023a), ela representou aproximadamente 17% do consumo final de energia da indústria em 2022. Uma parte significativa desse consumo está relacionada à energia térmica (calor e vapor), destacando-se como o fator com maior potencial de emissão de gases de efeito estufa na indústria de celulose e papel.

É importante salientar, entretanto, que, no Brasil, esse setor é relevante autogerador de energia e destaque na transição para fontes renováveis. As emissões de carbono provenientes da geração de energia dessa indústria são consideradas biogênicas, ou seja, são emissões de carbono que têm origem em fontes biológicas ou orgânicas, como biomassa, resíduos agrícolas e florestais. Como as emissões derivam da queima de materiais orgânicos e fazem parte do ciclo natural do carbono, são classificadas como neutras pelo Greenhouse Gas Protocol.[54]

FIGURA 19. Processo produtivo da floresta



Fonte: Adaptado de IBÁ (2023).

PROCESSO DE PRODUÇÃO DA CELULOSE

54 O Greenhouse Gas Protocol é uma iniciativa desenvolvida pelo World Resources Institute (WRI) em parceria com o World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). Ele fornece diretrizes e padrões para contabilizar e relatar as emissões de GEEs de atividades humanas.

O processo de produção de celulose *kraft*[55] é um método amplamente utilizado para obter celulose a partir da madeira. É um processo químico no qual ocorre a quebra e a dissociação das ligações entre a lignina, a celulose e a hemicelulose, elementos estruturais da madeira. Nesse processo, emprega-se um agente químico denominado licor branco, que é uma solução aquosa composta por hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na_2S), responsável por separar as fibras de celulose da lignina.

Esse processo é conhecido por sua eficiência na produção de celulose de alta qualidade, especialmente adequada para a fabricação de papéis de alta resistência, e tem a vantagem de aproveitar uma grande parte dos componentes da madeira, resultando em um rendimento global significativo.

Após aproximadamente sete anos de plantio, a madeira de eucalipto é colhida mecanicamente e transportada para a indústria, na qual passa por um processo de trituração em um picador, que transforma as toras de madeira em cavacos, pequenos fragmentos de madeira.

Os cavacos seguem para uma etapa de cozimento a alta pressão e temperatura em reatores chamados digestores, onde são misturados ao licor branco. O calor e os produtos químicos separam a lignina das fibras de celulose. A celulose é preservada, mas a lignina – substância que une as fibras de celulose, tornando-a rígida – se dissolve na solução. O resultado é uma suspensão de fibras em meio a um líquido denominado licor preto.

Nesse momento, ocorre a separação do licor preto das fibras de celulose (também chamada de polpa cozida). A polpa de celulose é lavada para remoção e recuperação dos produtos químicos que reagiram no digestor. Após a lavagem, é submetida a agentes químicos, com o objetivo de oxidar a lignina residual, e, então, branqueada. Em seguida, passa por aquecedores para atingir a umidade desejada e, depois, é embalada em fardos ou rolos, estando pronta para ser enviada para venda ou para a produção de diversos tipos de papéis e produtos.

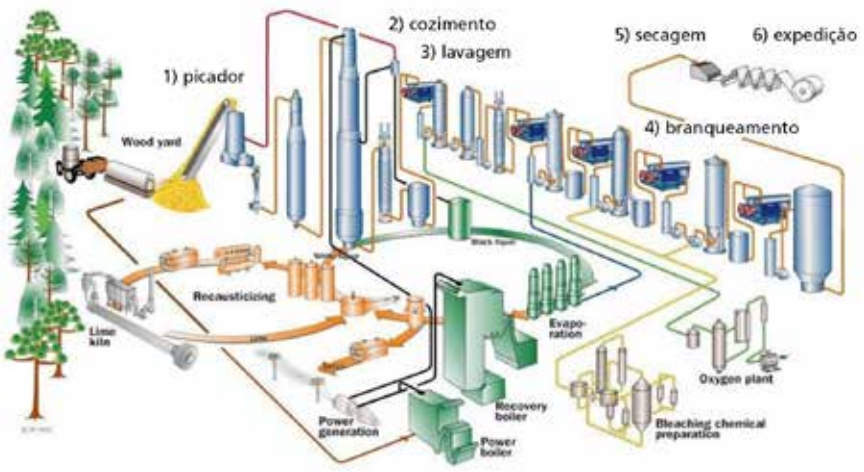
Enquanto as fibras de celulose seguem o caminho[56] de lavagem, branqueamento, secagem e expedição, o licor preto segue para queima na caldeira de recuperação. Nessa etapa, ocorre a recuperação de produtos químicos valiosos, como o hidróxido de sódio, e a geração de calor/vapor, que é aproveitado na cogeração de energia utilizada em diferentes estágios do processo de produção.

Do processo de recuperação, parte do licor residual é retirada e forma o que é chamado de licor verde. A esse licor verde, adiciona-se cal para remoção de impurezas, formando o licor branco novamente, que retorna ao processo, e uma lama de cal como subproduto. Essa lama é calcinada em um forno de cal, também retornando cal ao processo.

55 Segundo a IBÁ (2023), em 2022, o percentual de celulose produzido no Brasil pelo processo *kraft* foi de aproximadamente 97,5%.

56 O processo de lavagem, branqueamento, secagem e expedição da celulose segue a linha verde da Figura 20.

FIGURA 20. Processo produtivo da celulose



Fonte: Apresentação da IBÁ realizada em 19.9.23 no Seminário de Descarbonização da Indústria de Base Florestal no BNDES.

Na indústria de celulose, as atividades com maior potencial de emissões de GEEs são a caldeira de recuperação, o forno de cal e os aquecedores. Segundo Del Rio e outros (2022), a caldeira de recuperação tem o potencial de gerar a maior parte das emissões de CO_2, cerca de 74%, enquanto a caldeira de força representa 14% e a calcinação no forno de cal contribui com 12%. Entretanto, ao serem majoritariamente abastecidos por energia gerada a partir da biomassa, esses processos produzem CO_2 biogênico, ou seja, carbono neutro. Segundo o International Council of Forest and Paper Associations (ICFPA, 2022), a IEA Bioenergy (Cowie *et al.*, 2021) e o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2018), o CO_2 liberado não representa uma adição líquida na atmosfera, pois faz parte do ciclo biológico do carbono e tem um ciclo mais curto de vida, comparado ao das emissões derivadas dos combustíveis fósseis.

Como será detalhado na subseção seguinte, em um esforço contínuo da indústria para aprimorar os processos e aumentar a produtividade dos recursos, os resíduos resultantes desses processos são reaproveitados para geração de energia, reciclagem ou reutilização. Segundo a IBÁ (2023), apenas 5% dos resíduos seguem para aterros – o restante é reaproveitado no sistema de produção.

PROCESSO DE PRODUÇÃO DO PAPEL

O processo de produção de papel tem início com o recebimento do rolo de celulose na fábrica. A celulose é preparada, desfibrada e transformada em uma suspensão aquosa despejada sobre uma tela para formar uma folha úmida. Após prensagem para remover água, a folha passa por secagem, podendo ser submetida a processos adicionais como calandragem[57]

57 Calandragem de papel é um processo industrial que usa pressão e calor para melhorar a qualidade do papel, tornando sua superfície mais uniforme, brilhante e resistente, além de controlar a espessura e melhorar suas propriedades ópticas.

e revestimento. O papel é então inspecionado quanto à qualidade, incluindo espessura e resistência, antes de ser embalado em rolos ou folhas para distribuição e uso em uma variedade de produtos.

Na indústria papeleira, a demanda por calor ocorre principalmente devido às grandes quantidades de água que precisam ser evaporadas durante a secagem da polpa e do papel. A etapa de secagem representa 70% do consumo de energia no setor.

Em sua maioria, o papel é produzido por indústrias integradas às de celulose, logo, apesar de intensivas em energia, se abastecem com energia de fontes renováveis autogerada na planta de celulose, a partir de biomassa e licor preto, que são menos intensivas em GEEs pelo Greenhouse Gas Protocol (Hora; Melo, 2016).

Rotas de descarbonização da indústria de base florestal

A indústria de base florestal brasileira apresenta significativo potencial para contribuir para a transição para uma economia de baixo carbono, a partir de: (i) remoções e estoque de CO_2 pelas árvores por meio da gestão sustentável das florestas; (ii) emissões evitadas no processo produtivo, tanto pela reutilização de resíduos e subprodutos (circularidade) quanto pela autossuficiência energética com o uso de fontes renováveis; e (iii) a substituição[58] de produtos com alto teor de carbono, geralmente de origem fóssil, por produtos que contêm carbono biogênico, proveniente de fontes naturais renováveis.

FIGURA 21. Contribuição da indústria de base florestal para a economia de baixo carbono

Fonte: Adaptado de IBÁ (2018).

Em relação à atividade industrial, o setor tem avançado nos eixos de descarbonização apresentados no Quadro 6.

58 Embora a quantidade total de carbono possa ser semelhante, a substituição é considerada benéfica para o meio ambiente, pois o carbono biogênico contribui para a reciclagem natural do ciclo do carbono. Isso contrasta com a emissão de carbono de origem fóssil, que adiciona carbono extra à atmosfera, contribuindo para o aumento do efeito estufa.

QUADRO 6. Rotas para descarbonização na indústria de base florestal

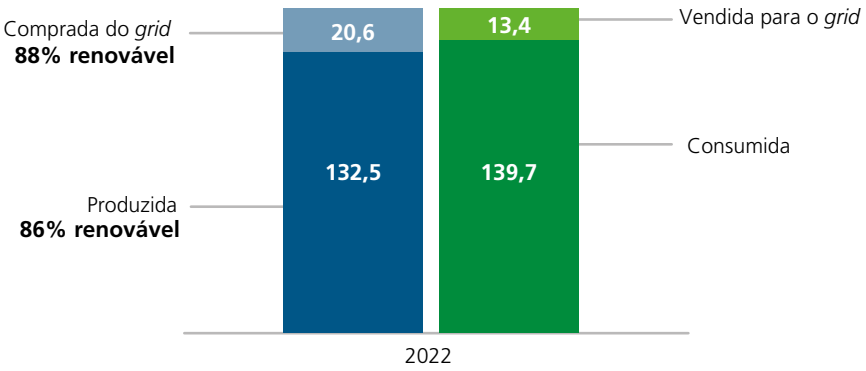
Rotas de curto e médio prazo	i. Eficiência energética e fontes de energia renováveis e de baixo carbono; ii. Reaproveitamento dos recursos; e iii. Redução de emissões em transporte.

Fonte: Elaboração própria.

MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E A TRANSIÇÃO PARA FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS E DE BAIXO CARBONO

Em 2022, conforme dados da IBÁ (2023), o setor consumiu um total de 139,7 milhões de giga joules (GJ) de energia, sendo apenas 14,7% provenientes da rede elétrica. A maior parcela dessa demanda foi atendida pela autogeração de energia das empresas, destacando-se o fato de que 91% da energia produzida internamente foi proveniente de fontes renováveis (78% de licor preto e 13% de biomassa). Adicionalmente, o setor ainda contribuiu retornando o excedente para a rede, tendo disponibilizado 13,4 milhões de GJ de energia em 2022.

GRÁFICO 8. Matriz elétrica



Fonte: Adaptado de IBÁ (2023).

Considerando a natureza intensiva em energia da indústria, sua gestão eficiente é fundamental para o processo de descarbonização. Algumas empresas já atingiram a autossuficiência energética e exportam o excedente para a rede de distribuição. Essa abordagem está se tornando uma tendência, exemplificada pelas duas novas fábricas de celulose no país: o Projeto Cerrado da Suzano, em Ribas do Rio Pardo (MS), e a unidade da Bracell, em Lençóis Paulista (SP), ambas projetadas para funcionar completamente isentas de combustíveis fósseis.

Entre os caminhos promissores, está a produção de bioenergia a partir do licor preto, cuja queima na caldeira de recuperação libera calor, usado para gerar vapor de alta pressão. O vapor gerado na caldeira de recuperação é então utilizado como fonte de energia térmica em diferentes partes do processo. Parte desse vapor pode ser direcionada para acionar turbinas conectadas a geradores elétricos, fornecendo eletricidade para a fábrica. Outra parte do vapor pode ser usada para suprir as necessidades térmicas em várias etapas do processo, como secagem da celulose.

Investimentos possíveis para redução do uso de combustível fóssil e transição para fontes de energia renováveis e de baixo carbono são:

- Substituição das caldeiras movidas a combustíveis fósseis por caldeiras a biomassa, com uso de resíduos de biomassa gerados durante a manipulação da madeira, incluindo cascas, galhos, cavacos e outros subprodutos. Essas caldeiras são projetadas especificamente para queimar eficientemente esses materiais de biomassa, convertendo a energia térmica resultante da combustão em vapor. O vapor pode então ser direcionado para alimentar turbinas de geração de eletricidade ou processos industriais que demandam calor;
- Reatores de pirólise rápida para produção de combustível líquido a partir da biomassa (ex. *crude tall oil* – CTO) para uso em forno de cal. Nos reatores de pirólise rápida, o CTO, subproduto extraído principalmente do licor preto, é convertido em um bio-óleo que pode ser usado como combustível no forno de cal, substituindo combustível fóssil;[59]
- Reator de gaseificação para produção de gás de síntese para os fornos de cal. Nele, a biomassa é convertida em um gás combustível chamado gás de síntese;
- Uso de energia solar.

59 A Klabin tem estudado projetos com foco na redução do consumo de óleo combustível BPF em todas suas operações, a partir de plantas de produção de CTO, biocombustível oriundo do pinus, de bio-óleo, a partir da pirólise rápida da biomassa, e de Syngás, produto da gaseificação da biomassa.

BOX 19. Casos de eficiência energética e de fontes de energia renovável

Klabin

Projeto de gaseificação da biomassa: na ampliação da unidade industrial de Ortigueira (PR), projeto Puma II, a empresa adotou a medida de substituição de óleo combustível por uma fonte de energia renovável por meio da gaseificação da biomassa. O Syngás, gás de síntese, é gerado a partir da decomposição térmica de uma mistura de cavacos de pinus e de eucalipto, resíduos vegetais gerados na colheita das florestas plantadas da empresa e resíduos de madeira da área industrial.

Com esse projeto, a empresa deixará de consumir 21,5 mil toneladas por ano de óleo BPF, combustível derivado de petróleo, para abastecer um de seus fornos de cal, equipamento usado no tratamento de resíduos do processo de fabricação de celulose.

Com isso, a empresa afirma que sua matriz energética ultrapassará os 90,9% de participação de fontes renováveis e reduzirá as emissões de GEEs em 67 mil toneladas de CO2e por ano.

Além de colaborar consideravelmente para a redução das emissões de GEEs, a produção de Syngás ajuda na redução de custos operacionais da unidade industrial.

Projeto de substituição da caldeira de gás natural por uma caldeia de biomassa: apresenta redução de 15 milhões de metros cúbicos de gás natural por ano.

Outros projetos: secagem de lodos, produção de ácido sulfúrico de gases não condensáveis e recuperação de potássio, todos já implementados.

A empresa tem direcionado seus esforços para o aumento da eficiência energética e para a utilização de combustíveis renováveis, com o objetivo de chegar a 92% de energia oriunda de fontes renováveis até 2030, conforme previsto na Agenda Klabin 2030.

Irani

Projeto de caldeiras movidas a bioenergia (licor preto): está em andamento a implantação da caldeira de recuperação química, na planta da unidade papel em Vargem Bonita (SC). Esse projeto faz parte do aglomerado de projetos de expansão sustentável da Irani (Plataforma GAIA), sendo batizado como GAIA I e tendo um aporte financeiro estimado em aproximadamente R$ 600 milhões. O projeto tornará a unidade autossuficiente em energia elétrica em função de uma nova turbina termo a vapor, com capacidade de produção de 10 MW/hora. Por meio da produção de energia, a Irani evita a compra da rede, resultando em uma emissão evitada de gases de efeito estufa de aproximadamente 7.700 tCO2e, quando comparados aos níveis de emissão em 2022.

(continua)

(continuação)

Projeto Irani Biomass Electricity Generation de 2005: projeto de substituição de caldeira a óleo BPF por caldeira de cogeração de energia a biomassa na unidade de papel em Campina da Alegria (SC). O projeto foi registrado na ONU em 2006 como Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), pois permite a redução das emissões de GEEs, como metano e dióxido de carbono, e gera créditos de carbono emitidos sob o Protocolo de Quioto.

Além de evitar a emissão de GEEs pelo uso de biocombustível na geração de energia, a reutilização desses resíduos evita o processo de decomposição em aterros, que leva à emissão de gases de efeito estufa.

CMPC

Projeto BioCMPC: projeto de desativação da caldeira a carvão mineral na planta de Guaíba (RS), com o objetivo de prevenir o consumo anual de 1,2 TWh de carvão e diminuir 312 mil toneladas nas emissões de CO2e. A caldeira será substituída por uma movida a licor preto, o que resultará na conversão total da produção de energia elétrica para fontes renováveis. Esse movimento será acompanhado por um aumento de 18% na produção de celulose de fibra curta, tornando-se exemplo da aplicação prática da sustentabilidade ao equilibrar reduções significativas nas emissões com o crescimento da produção industrial.

Copapa

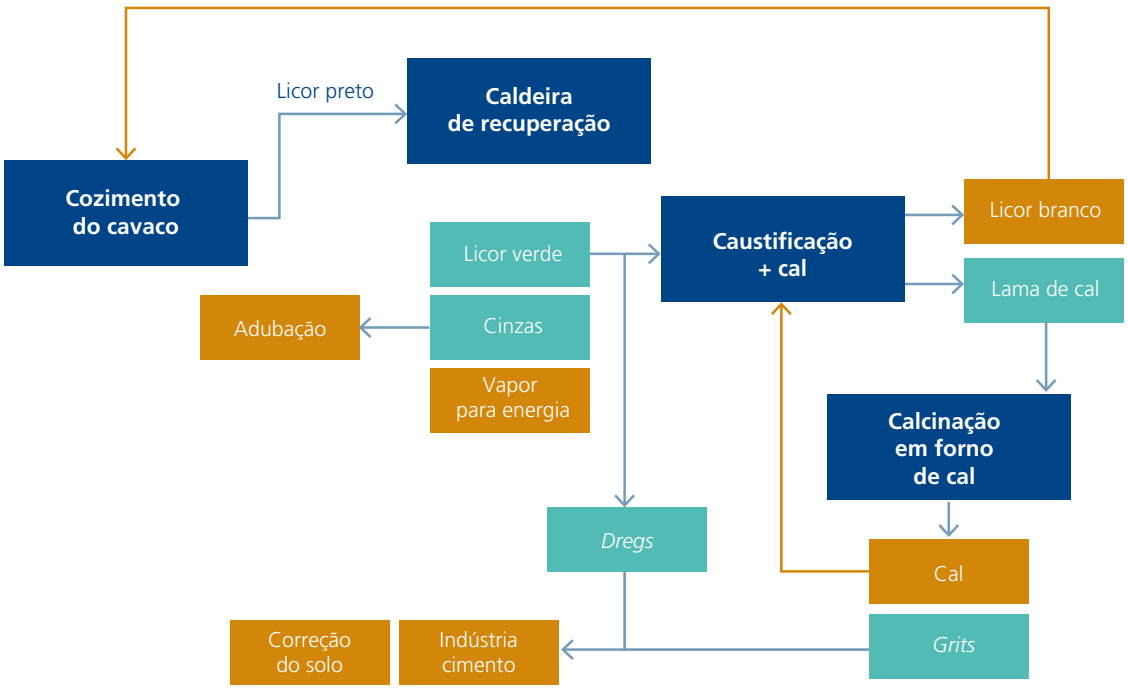
Substituição da capota a gás liquefeito de petróleo (GLP) por capota a vapor na máquina de papel tissue MP3: o resultado será a eliminação do consumo de gás e a redução no consumo de energia elétrica, o que significa 5,3 mil toneladas de CO2e evitadas.

REAPROVEITAMENTO DOS RECURSOS

A fábrica de celulose é fundamentada na circularidade. O ciclo de recuperação química e energética em uma planta de celulose é fundamental para otimizar os recursos e aumentar a produtividade dos insumos. Seu objetivo é recuperar os produtos químicos da solução de cozimento utilizada no processo de polpação e gerar vapor de alta pressão, por meio da queima do licor preto, que será usado para gerar energia elétrica nas turbinas. A recuperação de compostos como o carbonato de sódio forma o licor verde, que, após tratamento, retorna à área de polpação.

Vislumbram-se novas oportunidades de reaproveitamento de recursos, como: do lodo da estação de tratamento de esgoto (ETE), tanto na caldeira de energia quanto na fabricação de compostos para fertilização; das cinzas para produção de potássio, fertilizante utilizado na adubação das florestas; e do enxofre do gás sulfeto de hidrogênio para a produção de ácido sulfúrico para uso no branqueamento.

FIGURA 22. Ciclo de recuperação química e energética



Fonte: Adaptado de IBÁ (2023).

A reciclagem de papel também contribui significativamente para a redução de emissões. O setor de papel brasileiro é um dos líderes mundiais em reciclagem – com um sistema de logística reversa consolidado há anos, o país alcançou uma taxa de reciclagem de papel ondulado de 76% em 2022, de acordo com dados da IBÁ (2023). Em comparação, a taxa de reciclagem da cadeia de papel na Europa foi de 71% em 2021, conforme a Confederation of European Paper Industries (2022).

REDUÇÃO DE EMISSÕES EM TRANSPORTE

Na logística, diversas empresas têm projetos para diminuir suas emissões, tanto no transporte de madeira, quanto no escoamento de produtos como celulose, papel e placas de madeira:

- Empilhadeiras e outros equipamentos elétricos.
- Veículos movidos a combustíveis menos intensivos em carbono – híbridos e elétricos –, sobretudo no transporte rodoviário da madeira e dos produtos finais.
- Concessões privadas para construção de ferrovias, que apresentam maior capacidade de carga.
- Compromissos internacionais para redução de emissões nas frotas de navios.

BOX 20. Casos de redução de emissões em transporte

CMPC

Projeto-piloto de caminhões de transporte florestal com eixo elétrico: o semirreboque Hybrid R da Randon, equipado com a tecnologia Suspensys e-Sys, economiza energia principalmente durante descidas e frenagens. Essa mudança tem o objetivo de promover a descarbonização e reduzir em até 20% o consumo de combustível nas viagens para transporte de madeira.

Projeto de logística fluvial: abrange o transporte de madeira e celulose, permitindo a redução de 85 mil viagens de caminhão por ano. Os portos em Guaíba, Pelotas e Rio Grande (RS) são utilizados para o transporte de madeira do Porto de Pelotas até Guaíba. Após o armazenamento, a mesma barcaça é carregada com celulose e segue até o Rio Grande para a exportação do produto. Essa estratégia resulta na redução de 60 mil toneladas de CO_2 por ano.

Em resumo, para ampliar sua contribuição para uma economia de baixo carbono, a indústria de base florestal deve implementar estratégias transversais que vão além de iniciativas de eficiência energética e considerar medidas relacionadas à reciclagem, à eficiência de recursos e até mesmo à transição de modelos de negócios em direção à bioeconomia.

A próxima seção abordará os desafios para a realização de investimentos em descarbonização nas indústrias de base.

DESAFIOS PARA OS INVESTIMENTOS EM DESCARBONIZAÇÃO

Durante o Seminário de Descarbonização das Indústrias de Base, de forma geral, os participantes destacaram que um dos principais desafios relacionados aos investimentos em descarbonização diz respeito ao retorno financeiro esperado, ajustado ao risco, desses novos investimentos. Vale notar que os produtos da indústria de base são, predominantemente, *commodities* com preços definidos pelo mercado. Para que os vultosos investimentos em descarbonização se sustentem economicamente e possibilitem a transição da indústria em condições competitivas internacionalmente, é imperativo estabelecer uma diferenciação entre os produtos de baixa e alta pegada de carbono por meio de mecanismos de precificação.

A fim de promover uma competição mais equânime no mercado e o incentivo ao investimento em tecnologias de menor emissão, faz-se necessário, primeiramente, a internalização do custo de emissão do carbono. A possibilidade da cobrança do prêmio verde pelo vendedor, por sua vez, está sujeita à preferência do mercado consumidor em adquirir produtos desse tipo. Esse adicional é aplicado sobre o preço padrão do produto, já incluindo os custos de carbono internalizados. Os elementos-chave para o funcionamento do mercado de carbono e os parâmetros de precificação do prêmio verde serão discutidos no Box 21.

Se, atualmente, o estímulo por meio de incentivos positivos ainda é limitado, a pressão oriunda de mecanismos de proteção contra a fuga de carbono[60] em países importadores é iminente. Um exemplo é o mecanismo de ajuste de fronteiras de carbono (CBAM) da União Europeia, implementado em outubro de 2023. Após a implementação desse mecanismo, as importações serão acrescidas de um valor de ajuste de emissão de carbono equivalente ao preço que teria sido desembolsado se os produtos tivessem sido produzidos de acordo com as regras de precificação de carbono do Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia (Emissions Trading System – ETS).

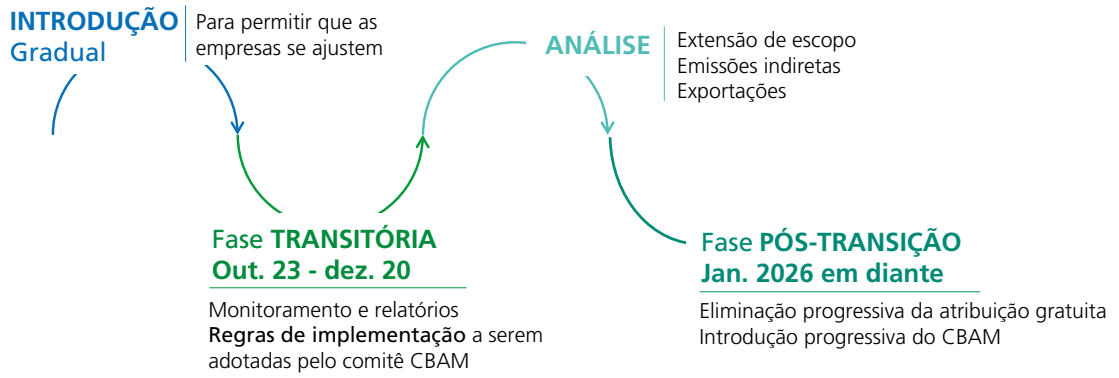
A atual fase introdutória durará até 2025 e é um período-piloto para coletar informações e aprimorar a metodologia de reporte das emissões. Durante esse período, os importadores de bens dos setores de siderurgia, cimento e fertilizantes[61] só precisarão relatar as emissões de GEEs relativas a suas importações, sem a necessidade de comprar e entregar certificados. Essa fase também está alinhada com a eliminação da alocação de licenças gratuitas sob o ETS. O CBAM será aplicado em seu regime definitivo a partir de 2026.

---

60 A fuga de carbono é um fenômeno que ocorre quando políticas ou medidas adotadas para reduzir as emissões de carbono em uma região incentivam o aumento das emissões em outra região, seja pela migração de indústrias intensivas em carbono para locais em que as regulamentações são mais brandas, seja pelo aumento das importações.

61 Além de hidrogênio e eletricidade.

FIGURA 23. Fases de implementação do mecanismo de ajuste de fronteiras de carbono (CBAM)



Fonte: Adaptado de EU Comission (2023).

A implementação de regulamentações ambientais mais rigorosas traz desafios à competitividade de empresas e países na transição para a economia de baixo carbono. Os fluxos de comércio podem ser alterados quando tradicionais exportadores encontrarem dificuldade em atender às exigências ambientais ou perderem sua competitividade em mercados como a União Europeia e, potencialmente, em outros que venham a seguir restrições ambientais similares, ao internalizar o custo das emissões de carbono.

Nesse sentido, além do esforço de descarbonização, faz-se necessária a implementação de um sistema nacional de precificação de carbono e a adoção de um mecanismo de ajuste de fronteira no Brasil.

O sistema de precificação de carbono desempenha o papel de internalização dos custos ambientais nas atividades econômicas, incentivando a adoção de tecnologias necessárias à descarbonização, por garantir retorno financeiro satisfatório. Essa medida é essencial não apenas para incentivar a redução das emissões de GEEs em nível nacional, mas também para adequar a produção nacional de forma a garantir direito a certificados das emissões embutidas em seus produtos, como o CBAM,[62] e garantir a competitividade das indústrias brasileiras em um mercado global cada vez mais regulado e consciente das questões ambientais.

Por sua vez, uma taxa de ajuste de fronteira, pelo lado da importação, pode ajudar a proteger as indústrias nacionais da concorrência desleal de produtos de países com regulamentações ambientais menos rigorosas e, assim, impedir que o Brasil se torne destino de produtos de maior pegada de carbono. No caso da importação, a adoção de uma taxa de ajuste de fronteira favorece os produtos brasileiros menos intensivos em carbono. Como país exportador, é preciso garantir que as taxas que incidem sobre as emissões embutidas

62 O CBAM permite que um produtor de fora da União Europeia, ao demonstrar o pagamento de emissões de carbono no país de origem, tenha esse valor deduzido para o importador dentro da União Europeia, evitando assim a dupla cobrança.

dos produtos sejam aplicadas de forma coerente. É imprescindível alinhar os mecanismos de ajuste de taxa de fronteira que vierem a ser implementados com as regras da Organização Mundial do Comércio (OMC) para que se garanta que as empresas exportadoras não sejam tributadas de forma mais intensa do que as que operam no país de destino.

Na ausência de tais medidas, a concorrência com produtos derivados de combustíveis fósseis importados ou locais atuaria como forte desincentivo para os investimentos em projetos de descarbonização.

BOX 21. Custo de emissão do carbono e o prêmio verde

Existe uma tendência crescente, em alguns setores e regiões, para a internalização do custo de emissão de carbono, incorporando-o no preço dos produtos como forma de incentivar a redução das emissões de gases de efeito estufa. Para que o mercado de carbono funcione de maneira eficaz, alguns elementos-chave são necessários: (i) a precificação do carbono, seja por meio de um sistema de comércio de emissões (como o ETS da União Europeia) ou por impostos sobre o carbono; (ii) o desenvolvimento de padrões e metodologias de medição das emissões de carbono de empresas, produtos e processos, de forma a permitir a contabilização e o comércio de créditos de carbono; (iii) a existência de sistemas de registro e verificação para garantir a integridade e a transparência das transações de carbono; e (iv) a capacidade de rastreamento preciso e auditável da pegada de carbono para certificar a origem e a qualidade dos créditos de carbono.

Em relação ao prêmio verde, diferentes forças moldarão sua existência, comportamento e precificação. Quando se trata do limite superior, acredita-se que ele será definido pela força da demanda pelo produto de menor pegada de carbono e pela disposição dos consumidores em pagar essa cobrança extra. É provável que essa disposição seja diferente por segmento de uso final, dependendo da materialidade das emissões relacionadas ao produto em questão em sua cadeia de suprimentos, mas também de sua sensibilidade a aumentos de preços.

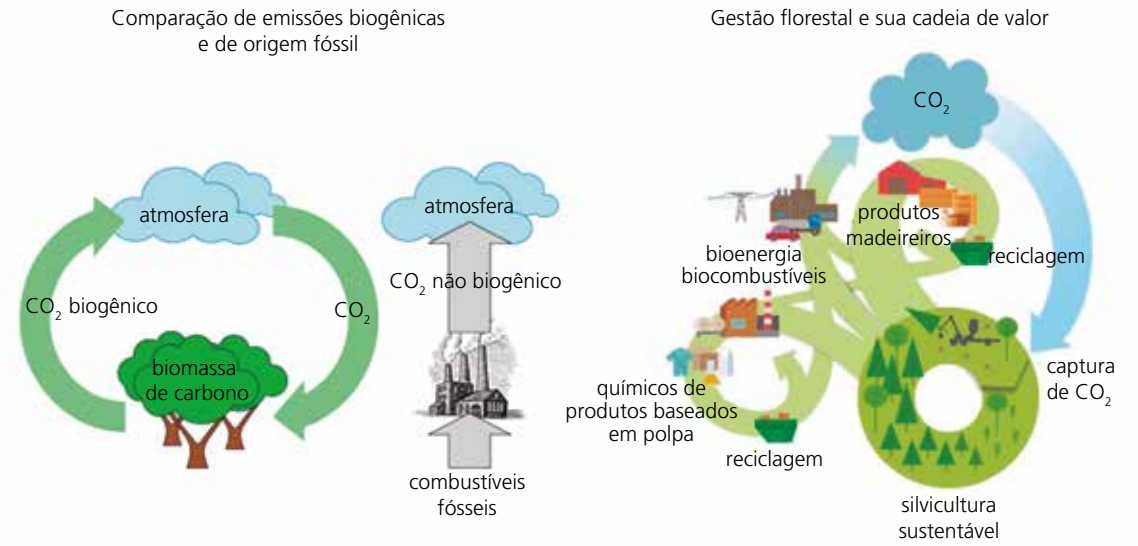
Quando se trata do limite inferior, o principal fator seria o custo de descarbonizar. Serão determinantes para fundamentar a magnitude desse prêmio pelo lado da oferta: a escassez ou a disponibilidade de insumos; e os custos tanto operacionais (opex) quanto de capital (capex) com que os produtores terão que arcar para serem capazes de fabricar com menor pegada de carbono e trazer esses produtos ao mercado.

Conforme apresentado pelos representantes da indústria de base durante o seminário, o prêmio verde ainda não é uma realidade de mercado.

Outro desafio digno de atenção, extensível a diversos setores industriais brasileiros para além dos *hard-to-abate*, envolve a substituição de matérias-primas e combustíveis derivados de fontes fósseis por biomassa, biocombustíveis e biometano, como parte da transição para

uma economia de baixo carbono. Nesse contexto, as emissões biogênicas têm enfrentado críticas em nível internacional.[63]

FIGURA 24. Biomassa – emissões biogênicas e a cadeia de valor



Fonte: Cowie e outros (2021).

Entretanto, segundo Cowie e outros (2021), as críticas sobre os impactos climáticos da bioenergia se devem, em parte, à grande variedade de sistemas de bioenergia e contextos, além das diferenças nos métodos de avaliação. Os autores propuseram a abordagem sistêmica do ciclo de vida do carbono como método mais apropriado para avaliar a contribuição do carbono biogênico. Eles defendem o papel significativo da bioenergia na transição para uma economia de baixo carbono, enfatizando a importância de critérios de transparência e consistência na contabilidade de gases de efeito estufa.

> A medida mais importante de mitigação das mudanças climáticas é a transformação dos sistemas de energia, indústria e transporte para que o carbono fóssil permaneça no subsolo. Perspectivas estreitas obscurecem o papel significativo que a bioenergia pode desempenhar ao substituir combustíveis fósseis agora e apoiar a transição do sistema energético (Cowie *et al.*, 2021, p. 1211).[64]

63 Informações retiradas de Cowie e outros (2021). O artigo examina debates relacionados aos impactos climáticos da bioenergia florestal em aplicações que incluem produção de calor, geração de eletricidade e transporte.

64 No original: "*The most important climate change mitigation measure is the transformation of energy, industry and transport systems so that fossil carbon remains underground. Narrow perspectives obscure the significant role that bioenergy can play by displacing fossil fuelsnow, and supporting energy system transition. Greater transparency and consistency is needed in greenhouse gas reporting and accounting related to bioenergy*."

De maneira análoga, em seu último relatório, o IPCC (2023) ressaltou o potencial da tecnologia de bioenergia combinada com a captura e/ou estoque de carbono (*bioenergy with carbon captures and storage* – BECCS) para o cumprimento das metas climáticas de emissões líquidas nulas (*net zero*). Esse potencial advém da capacidade da bioenergia de alcançar neutralidade carbônica, possibilitando, com a CCUS, a remoção de CO_2 da atmosfera (EPE, 2023c).

O Brasil tem amplo conhecimento e experiência nessa tecnologia. Portanto, o foco na defesa de uma vantagem competitiva brasileira nesse cenário em evolução é crucial.

Desafios para a indústria de cimento

Para atingir as metas necessárias de descarbonização, a indústria de cimento necessita de avanços tecnológicos, uma abordagem aprimorada de economia circular e capacitação dos atores da cadeia do cimento, além do avanço em questões regulatórias.

Começando pela questão das adições ou da substituição do clínquer por outros materiais, como escórias de alto-forno, cinzas volantes, *filler* calcário ou argilas calcinadas, o setor esbarra em normas brasileiras que limitam o uso de *filler* calcário a no máximo 10%, sendo necessária a modernização normativa para que seja permitido seu uso com outros materiais pozolânicos e o desenvolvimento de outros tipos de cimento (Visedo; Pecchio, 2019). Essa tecnologia enfrenta desafios como a disponibilidade e o custo dos materiais substitutos, bem como a necessidade de adaptação dos processos produtivos, o que também aumentaria os custos envolvidos. Também seriam necessários programas de pesquisa para o desenvolvimento de novos produtos com teores mais elevados de adições e de novos materiais a serem utilizados como substitutos de clínquer, além da educação do consumidor quanto às melhores práticas de uso do cimento.

A tecnologia para a substituição dos combustíveis fósseis por combustíveis alternativos, como biomassa ou resíduos, enfrenta desafios como a disponibilidade, os custos de logística e transporte (que são geralmente mais caros) e as exigências ambientais e de licenciamento. Outro dificultador é a destinação de resíduos sem o atendimento à hierarquia de gestão estabelecida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, que prioriza a recuperação energética em relação à disposição em aterros. Além disso, para todos os setores com demanda por resíduos urbanos, existe a dificuldade de estabelecimento de contratos de longo prazo de suprimento com os agentes públicos.

Por fim, para alcançar o *net zero* na indústria de cimento, faz-se necessário o uso de tecnologias inovadoras, como a CCUS. No entanto, essas tecnologias ainda estão em fase de desenvolvimento e enfrentam desafios como os altos custos de investimento e operação, bem como a necessidade de infraestrutura e regulamentação diante do baixo valor de mercado dos produtos de cimento. Além disso, é uma tecnologia que enfrenta certa resistência por parte da sociedade pela preocupação com sua segurança e efetividade.

Desafios para a indústria siderúrgica

As alternativas para descarbonizar a indústria siderúrgica, no curto e médio prazo, mantendo a utilização de carbono como agente redutor, envolvem desafios significativos. Um deles é o aumento do uso de sucata, que depende da disponibilidade desse material nos mercados doméstico e internacional. No Brasil, a geração de sucata está limitada em função do lento crescimento do consumo de aço no país. Além disso, segundo o Instituto Aço Brasil,[65] 42 países (equivalente a 68,5% da produção mundial de aço) impuseram restrições à exportação de sucata.

Uma alternativa é substituir a injeção de carvão pulverizado (PCI) por gás natural e outras fontes em unidades de produção siderúrgica. Contudo, essa transição requer garantias de oferta de gás natural a preços competitivos e enfrenta desafios logísticos, como a falta de infraestrutura de transporte para gás *offshore*. Além disso, as tarifas de gás natural no país estão consideravelmente elevadas em comparação com outros países, o que torna essa opção menos atrativa.

Outra alternativa de curto e médio prazo para a descarbonização é o aumento da produção pela rota a carvão vegetal. No entanto, esse método esbarra na escassez de áreas disponíveis para o plantio de florestas dentro de um raio econômico viável. Além disso, a capacidade de produção dos altos-fornos a carvão vegetal é limitada devido às características de friabilidade do carvão vegetal, o que faz com que a rota a carvão vegetal seja uma opção para a instalação de novos fornos de produção de ferro primário.

No longo prazo, é prevista a mudança de rota de produção com substituição do carbono como agente redutor pelo hidrogênio verde (H_2v), beneficiando-se do uso de gás natural em sua transição e do uso da sucata no médio prazo, conforme os desafios citados acima.

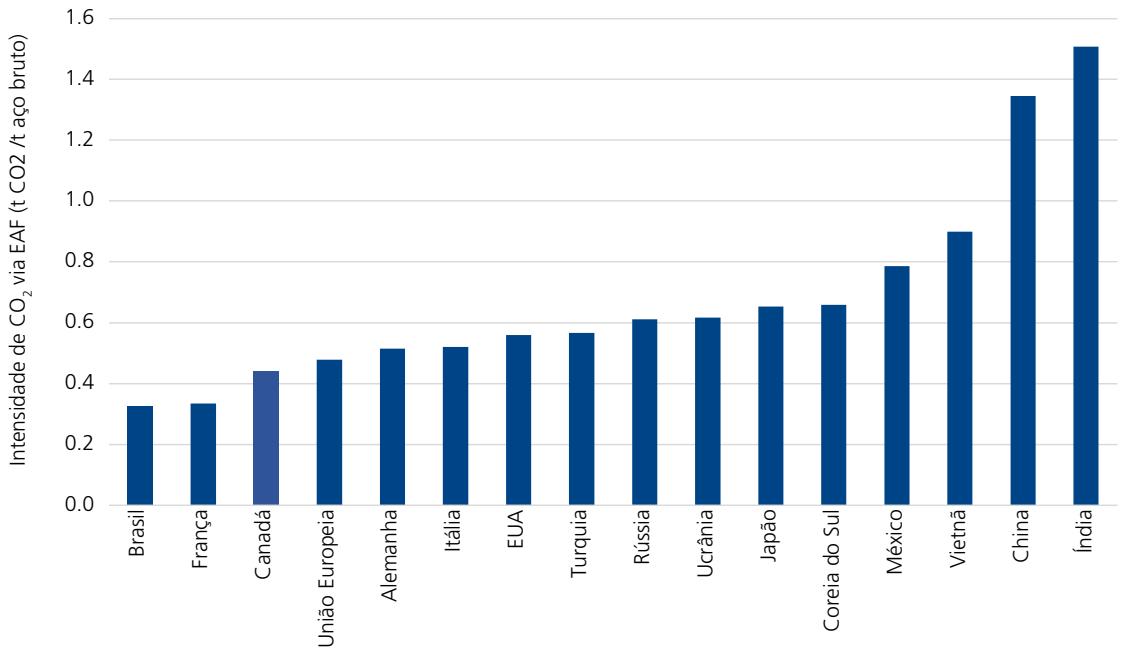
Segundo dados da World Steel Association (2023), a média global de emissões de CO_2 por tonelada de aço bruto foi de 1,91 t em 2022. Essas intensidades diferem entre os países de acordo com: a participação da produção via EAF na produção total de aço; o *mix* de combustíveis na indústria siderúrgica; o fator de emissão de CO_2 da rede elétrica; os tipos de matéria-prima disponíveis para as rotas a alto-forno (BF/BOF) e a forno elétrico (EAF); o nível de penetração de tecnologias de eficiência energética; o mix de produtos siderúrgicos em cada país; a idade de suas instalações de fabricação de aço; a utilização da capacidade; as regulamentações ambientais; o custo de energia e matérias-primas; e a definição de limites para a indústria siderúrgica.

Conforme o Gráfico 9, a produção via EAF no Brasil, em comparação a seus pares, produz aço de baixa intensidade de emissão de carbono, devido à matriz elétrica renovável. A produção

65 Apresentação realizada pelo Instituto Aço Brasil em 11.7.23 no Seminário de Descarbonização da Indústria Siderúrgica no BNDES.

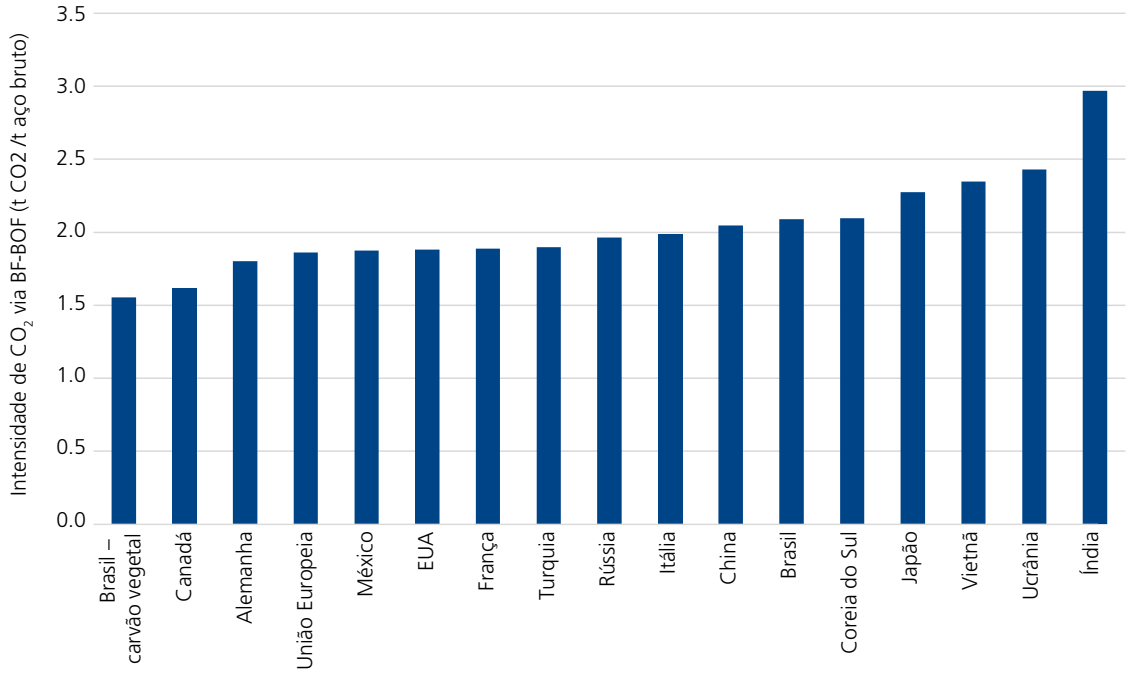
via alto-forno (BF/BOF) a partir do carvão vegetal (Gráfico 10) merece destaque similar por sua sustentabilidade advinda da captura biogênica das florestas plantadas com essa finalidade.

GRÁFICO 9. Intensidade carbônica na produção de aço via rota EAF (2019)



Fonte: Adaptado de Hasanbeigi (2022).

GRÁFICO 10. Intensidade carbônica na produção de aço via rota BF/BOF (2019)



Note que a intensidade carbônica indicada pelo IABr na rota integrada a carvão vegetal é de 0,7 CO2e t/t aço bruto.
Fonte: Adaptado de Hasanbeigi (2022).

Considerando que cada tonelada de CO2e emitida por tonelada de aço bruto produzido e vendido irá requerer a aquisição de um certificado de mecanismo de ajuste de fronteira (a exemplo do CBAM), as plantas localizadas nos países com produção de maior intensidade carbônica (mais à direita no eixo horizontal de cada gráfico) tendem a perder competitividade em relação às demais. Nesse contexto, surge uma oportunidade para o Brasil: com suas reservas de minério de ferro de alta qualidade para a produção de DRI, sua capacidade comprovada na produção em escala de biomassa certificada e uma matriz energética predominantemente renovável, o país está bem-posicionado para capitalizar essa conjuntura. Essas vantagens devem permitir tanto atender à demanda interna quanto elevar sua participação na oferta global de produtos siderúrgicos de baixo carbono.

No entanto, a falta de implementação de um sistema nacional de precificação de carbono e a ausência de um mecanismo de ajuste de fronteira no Brasil poderiam deixar o país vulnerável ao aumento da importação de produtos siderúrgicos com maior intensidade de carbono. Esse cenário é agravado pelo excesso mundial de capacidade de produção de aço. Ou seja, caso os produtos mais intensivos em carbono enfrentem dificuldades de comercialização em mercados com regulamentações ambientais mais rígidas, os países desprotegidos podem se deparar com uma forte entrada de produtos de alta intensidade carbônica a preços abaixo do custo de produção doméstica.

É notável a evolução das importações de aço pelo Brasil nos últimos vinte anos, com destaque para o aumento significativo das importações provenientes da China. Em 2000, as importações totais de aço atingiram 930 mil toneladas, sendo apenas 12 mil provenientes da China. Em contraste, em 2023, as importações diretas de aço totalizaram 5 Mt, com 2,9 Mt provenientes da China. Essa mudança no padrão de importação reflete as transformações na dinâmica do comércio internacional de aço ao longo das últimas duas décadas, porém ainda sem considerar a entrada em operação de mecanismos de ajuste de fronteira e outras medidas futuras. Consequentemente, o país e os produtores locais devem estar atentos aos desafios que a implementação de regulamentações ambientais mais rigorosas no comércio internacional trarão à competitividade durante a transição para uma economia de baixo carbono.

Desafios para a indústria de mineração

Um dos principais desafios da indústria de mineração está diretamente atrelado aos avanços na indústria siderúrgica, integrando um rastreamento de carbono preciso e auditável que começa na mina e se estende ao longo de toda a cadeia de valor a jusante.

Considerando que, de acordo com Soliman, Fletcher e Crocker (2017), 90% das emissões de GEEs da indústria de mineração se enquadram no escopo 3, a redução dessas emissões torna-se de extrema importância, superando o impacto das emissões diretas (escopos 1 e 2). Assim, a descarbonização do setor de mineração precisa transcender suas fronteiras con-

vencionais, por meio de iniciativas que visem a descarbonização das emissões de escopo 3. Um exemplo é o fornecimento de minerais estratégicos de zero carbono, como o lítio verde, e as iniciativas colaborativas da Vale no desenvolvimento de mega *hubs* para a produção de HBI e produtos de aço destinados aos mercados locais e transoceânicos, com uma expressiva redução das emissões de CO_2.

Sobre a contribuição da mineração como fonte dos materiais essenciais à transição energética, o desafio está na promoção de um ambiente de investimento que promova o aproveitamento racional dos recursos minerais. Políticas de incentivo e desenvolvimento do mercado de capitais para mineração são responsáveis pelos investimentos para descobertas e viabilização de novas minas em nível mundial.

Por se tratar de minerais críticos, as indústrias atualmente vivenciam uma verdadeira corrida por garantia de abastecimento de minerais de alta qualidade e menores custos, a fim de serem competitivas em seus segmentos.

O desenvolvimento das cadeias de minerais críticos representa importante elo para a maior inserção do Brasil nas indústrias de maior valor agregado a jusante, como a indústria de veículos elétricos e a geração de energias renováveis. Assim, políticas públicas específicas para esse fim, com apoio incentivado a diversos projetos para refino e processamento desses minerais, poderão elevar gradualmente a participação do país nessa indústria.

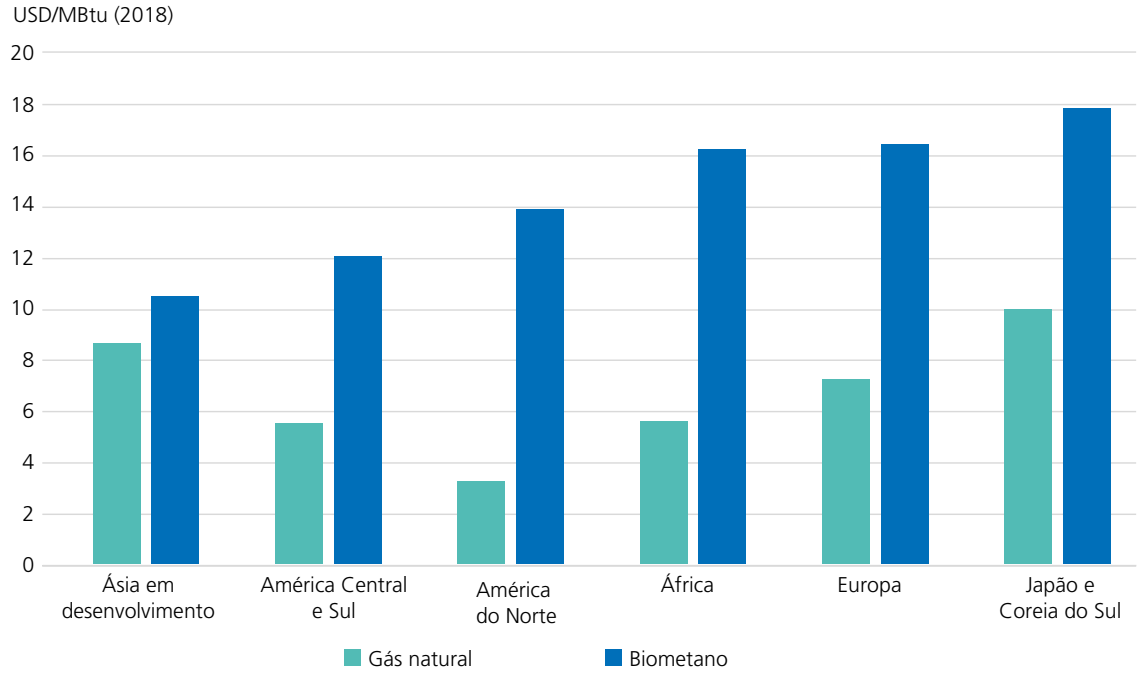
Desafios para a indústria química

A indústria química de base renovável, com o emprego de insumos como a biomassa, originários de atividades econômicas como agricultura e silvicultura, e com o uso de tecnologias de processamento revolucionárias ou alternativas (biotecnologia), é uma grande oportunidade para o Brasil.

A agroindústria brasileira é uma das mais desenvolvidas do mundo e tem sinergias e complementaridades com a química renovável. Segundo a Associação Brasileira da Indústria Química (Abiquim), em fala no Seminário de Descarbonização da Indústria de Base, o avanço da química dos renováveis pode elevar a indústria química brasileira a um novo patamar de competitividade, contribuindo com a redução do déficit da balança comercial de produtos químicos no país.

O uso de biomassa e/ou biometano para a descarbonização da indústria é uma alternativa que está sendo avaliada e que apresenta alguns importantes desafios. Além do obstáculo da viabilização do alto custo de investimento, como investimento em caldeiras de biomassa ou em infraestrutura para conectar produtores de biometano ao *grid* de gás natural, é necessário que os custos de produção e preço do biometano sejam competitivos em relação ao gás natural fóssil (Teixeira *et al.*, 2024).

GRÁFICO 11. Comparação dos custos do gás natural e do biometano[66] (2018)



Fonte: Adaptado de IEA (2020c).

Ademais, dificuldades também são encontradas em manter a competitividade dos combustíveis renováveis em comparação aos combustíveis fósseis ao longo do tempo. Por exemplo, o alto nível de correlação entre os preços da gasolina e do etanol no mercado brasileiro e a significativa variação de preço entre a safra (de abril a outubro) e a entressafra (de novembro a março) são fatores que oneram o custo do polímero vegetal.

Assim como os demais setores que se utilizam da biomassa para a descarbonização, sua disponibilidade e garantia de origem é essencial, tornando necessário o *compliance* socioambiental da cadeia produtiva de biomassa para que não se gere desmatamento, competição com alimentos e impactos nas comunidades vizinhas. Ainda, o processo deve ser pautado por relações trabalhistas justas. Por fim, deve-se observar os avanços da regulação aplicada ao segmento, que poderão impulsionar o uso do biometano com segurança jurídica nas indústrias de base.

Ainda que a maior sustentabilidade de nossa matriz elétrica e os esforços das empresas na descarbonização venham permitindo uma produção química menos intensiva em emissões no país quando comparada à da Europa e do resto do mundo, o cenário de aumento da capacidade ociosa e o aumento das importações em um cenário econômico internacional adverso é preocupante.

66 Custo de usar o biometano mais barato para atender a 10% da demanda de gás e preço do gás natural em regiões selecionadas.

Segundo depoimento da Abiquim no Seminário de Descarbonização da Indústria de Base, a adoção de uma taxa de ajuste de fronteira seria benéfica ao Brasil, por produzirmos produtos menos intensivos em carbono.

Para a sustentabilidade da cadeia, é importante um arcabouço jurídico que incentive e priorize o uso de fontes mais limpas em detrimento às fontes mais poluidoras ao longo dos próximos anos.

Desafios para a indústria de fertilizantes

Considerando o compartilhamento de processos, técnicas e matérias-primas com a indústria química, os desafios enfrentados pela indústria de fertilizantes são análogos aos mencionados na subseção prévia.

Durante o Seminário de Descarbonização da Indústria de Fertilizantes, os participantes destacaram a concorrência com a indústria de maior pegada de carbono. A falta de diferenciação de preço dos produtos com baixa pegada de carbono e a concorrência com produtos derivados de combustíveis fósseis, muitas vezes importados, atua como um desincentivo para os investimentos em projetos de descarbonização.

Esse cenário ressalta a necessidade de implementar medidas que valorizem produtos sustentáveis, priorizando iniciativas que alavanquem o potencial de uso dos recursos renováveis disponíveis, de forma a promover uma transição mais eficaz para práticas industriais mais ambientalmente conscientes.

Incentivos para alavancar o potencial uso de recursos renováveis disponíveis em nossa matriz energética seriam: (i) incentivos para escalar a indústria de biometano; (ii) incentivos para produção de hidrogênio verde; (iii) linhas de financiamento para projetos de eficiência energética e redução de emissões; (iv) implementação do mercado de carbono como indutor para acelerar a descarbonização na indústria; (v) a discussão de mecanismos de "taxação" de carbono para produtos importados, evitando a redução de competitividade de setores produtivos brasileiros que investem na redução da intensidade carbônica e garantindo a redução de emissões no Brasil; e (vi) o fomento para criação de corredores "verdes" de transporte e renovação de frota, favorecendo a redução de emissões de escopo 3 da indústria.

Desafios para a indústria de base florestal

Para a indústria de base florestal plantada, a descarbonização poderia ser impulsionada pelo reconhecimento mais amplo do potencial da biomassa das árvores cultivadas para a geração de biocombustíveis, que podem ser usados pela própria indústria ou por outros segmentos da economia. Também no campo das oportunidades, produtos financeiros e instrumentos de investimento que valorizem os benefícios climáticos do setor florestal

(bioenergia, remoções, processo circular) poderiam ser utilizados para investir em tecnologia industrial de descarbonização.

Durante o ciclo de seminários, a IBÁ apresentou a ideia da disponibilização de linhas ou produtos financeiros que possam ser compartilhados com a cadeia de fornecimento para incentivar sua descarbonização. Essa é uma medida importante para melhorar a eficiência e a resiliência das operações, atrair investimentos sustentáveis e preparar para novas regulações.

Uma oportunidade para a contribuição para a economia de baixo carbono está na evolução do modelo de negócios, com a viabilização das biorrefinarias. Os desafios, nesse caso, estão nos investimentos necessários em P&D para o avanço de tecnologias de processamento que possibilitem o uso integral da biomassa e no desenvolvimento de novos bioprodutos que gerem maior renda agregada.

A inegável vocação florestal brasileira, tanto natural quanto oriunda de esforços em pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I), tem potencial para colocar o país em uma posição singular no que tange ao mercado de bioprodutos derivados de biorrefinarias integradas às plantas de celulose. Entretanto, a migração para plataformas industriais integradas em biorrefinaria ainda é tímida no Brasil, pois há maior foco na venda de excedentes de eletricidade e vapor do que em novos e valiosos produtos, como biocombustíveis e biomateriais não energéticos, apesar de as unidades fabris e florestais serem grandes fornecedoras de biomassa de alta qualidade.

Por fim, o mercado regulado de carbono é uma medida importante para incentivar e acelerar investimentos da indústria em direção à descarbonização, e deve facilitar a possibilidade de transacionar como ativo o saldo resultante do balanço das emissões (diferença entre as emissões e as remoções).

O PAPEL DO BNDES

A descarbonização é um desafio significativo para setores industriais cujos processos envolvem grande consumo de energia e/ou são naturalmente emissores de carbono. No entanto, o BNDES entende que: (i) o estabelecimento de uma economia de baixo carbono deve ser encarado como uma oportunidade para reverter a desindustrialização precoce ocorrida no Brasil; e (ii) a política industrial deve estar a serviço do enfrentamento de importantes desafios da sociedade. Nesse sentido, a descarbonização das indústrias de base está totalmente inserida nas ações estratégicas do BNDES para apoio à indústria.

Assim, o Banco está disposto a exercer seu papel histórico como implementador e impulsionador de políticas estruturadas de desenvolvimento da economia brasileira, principalmente em um tema como a descarbonização, que tem sido um grande direcionador da política industrial em diversos países.

Apoio histórico às indústrias de base

Desde sua fundação, o BNDES tem contribuído diretamente para a construção da capacidade de produção do país, focando sempre no enfrentamento aos desafios que surgiram ao longo do tempo.

A indústria do aço é um dos exemplos mais evidentes desse papel exercido pelo BNDES. O Banco participou ativamente do processo de implantação de grandes usinas, exerceu papel central no período das privatizações e forneceu o capital necessário para ciclos subsequentes de modernização e expansão. Entre 2002 e maio de 2024, esse apoio somou R$ 15,2 bilhões[67] e se estende até os dias de hoje, tendo o BNDES financiado a implantação da Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP), uma das usinas mais modernas do mundo e fruto do último projeto *greenfield* do setor. O Complexo Industrial e Portuário do Pecém conta com infraestrutura qualificada para promoção de *hub* para produzir e exportar hidrogênio verde.

O crescimento da indústria de mineração no Brasil se deu de forma mais intensa a partir dos anos 2000, sendo seu principal *driver* a ascensão da China na economia mundial e sua incessante busca por *commodities*. Acompanhando a tendência de forte crescimento, o financiamento do BNDES ao setor se intensificou a partir desse período e alcançou R$ 25 bilhões[68] no final de 2023. O apoio envolveu também volume significativo de investimentos sociais, da ordem de R$ 150 milhões. Com isso, o BNDES participou diretamente do avanço das empresas na realização de investimentos nas comunidades

67 Desembolso entre 2002 e maio de 2024 em valor nominal. Disponível em: https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/transparencia/centraldedownloads. Acesso em: 10 jan. 2024.

68 Valor nominal. Compreende valor de financiamento a infraestrutura dedicada.

no entorno dos projetos, como construção e reforma de escolas e postos de saúde e treinamento de mão de obra.

O BNDES vem apoiando a indústria de cimento desde seu início, acompanhando seus ciclos de expansão. De característica notadamente cíclica, essa indústria historicamente vem crescendo de maneira não uniforme, tendo apresentado vigoroso crescimento na década de 1970 ("milagre econômico") e estagnação na década de 1980 ("década perdida"). Ao longo dos últimos vinte anos, período que abarcou o último grande ciclo de expansão, ocorrido entre 2007 e maio de 2024, o BNDES intensificou seu apoio e desembolsou cerca de R$ 4,6 bilhões[69] para investimentos no setor.

A trajetória da indústria química no Brasil está intrinsicamente vinculada à atuação do BNDES. Desde o início do setor no país, o BNDES teve uma participação ativa na implementação dos polos petroquímicos em São Paulo, Bahia e Rio Grande do Sul. Mais recentemente, na década de 2000, o Banco apoiou a implantação do primeiro polo de gás químico do Brasil, a Rio Polímeros. No período compreendido entre 2002 e maio de 2024, o apoio do BNDES às empresas do setor químico totalizou R$ 22,4 bilhões.[70]

O apoio do Banco ao setor de base florestal foi fundamental para que o Brasil alcançasse uma privilegiada condição competitiva.[71] O BNDES participou de quase todos os grandes projetos ou adições de capacidade implementados no país desde a década de 1950. Adicionalmente, apoiou a expansão da base florestal necessária para suportar esses aumentos de capacidade produtiva. Nos últimos dez anos (2014-2023), o Banco financiou o setor com aproximadamente R$ 21,7 bilhões, correspondendo a 48% do valor investido, demonstrando a importante presença do BNDES na execução de investimentos relevantes dessa indústria.

Por fim, na indústria de fertilizantes, entre 2002 e maio de 2024, o BNDES desembolsou R$ 2,6 bilhões[72] em financiamentos. Infelizmente, o setor não contou com as premissas necessárias para viabilizar novas adições de capacidade, por duas principais condições adversas: acesso e/ou custo elevado de matérias-primas e desvantagem tributária em relação a importados, o que contribuiu para aprofundar a dependência de produtos fertilizantes importados, cerca de 85%, conforme dados apurados no âmbito do Plano Nacional de Fertilizantes.[73]

---

69 Valor nominal. Disponível em: https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/transparencia/centraldedownloads. Acesso em: 10 jan. 2024.

70 Valor nominal, inclui os valores financiados para empresas de fertilizantes.

71 O Brasil é o segundo maior produtor global de celulose e o décimo produtor mundial de papéis.

72 Valor nominal.

73 O Plano Nacional de Fertilizantes busca orientar ações de elevação da produção nacional e redução da dependência externa atual.

Políticas e ações para investimentos futuros em descarbonização

Em consonância com as necessidades atuais da sociedade rumo à transição justa para uma economia de baixo carbono, a agenda climática é parte estratégica e transversal de toda a atuação do BNDES.

Nesse contexto, entendendo que o estabelecimento de uma economia de baixo carbono é uma oportunidade para reverter a desindustrialização precoce ocorrida no Brasil, o Banco busca promover a reindustrialização em novas bases – verde, inovadora, digital e inclusiva –, ampliando a complexidade do tecido industrial (bens e serviços de maior valor agregado).

Essa abordagem contempla o apoio a projetos de energia renovável, eficiência energética, biogás, biometano, hidrogênio de baixo carbono, florestas, transporte limpo, novas rotas de processos e muitas outras iniciativas que contribuem para o atingimento das NDCs brasileiras.

Com o objetivo de oferecer melhores condições para clientes e projetos que atendam metas de sustentabilidade, o Banco foi pioneiro em finanças verdes, tendo sido a primeira instituição brasileira a emitir *green bonds* (títulos verdes) no mercado internacional (US$ 1 bilhão, em 2017) e a primeira instituição financeira a emitir letras financeiras verdes no mercado doméstico (R$ 1 bilhão, em 2020).

Em 2021, o Banco lançou o *framework* de emissão de títulos sustentáveis *(sustainability bond framework*), ampliando as possibilidades de captação de títulos verdes, sociais e sustentáveis. Além disso, outras possibilidades de captação de recursos decorrem de parcerias com organismos multilaterais, reunindo entidades como Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), Japan Bank for International Cooperation (JBIC), Kreditanstalt für Wiederaufbau (KFW), New Development Bank (NDB), Agence Française de Développement (AFD) e NIB.

Para além do financiamento, o BNDES tem uma posição diferenciada na articulação público-privada voltada à elaboração e à execução de políticas públicas e investimentos relevantes. As frentes de atuação definidas nas *Diretrizes do BNDES para mudança climática* (BNDES, 2023) incluem: (i) a ampliação do financiamento e do engajamento de clientes; (ii) o alinhamento das atividades ao Acordo de Paris; (iii) a articulação com diversos atores e desenvolvimento de competências; (iv) a viabilização de recursos financeiros por meio da atração de recursos concessionais e privados para o interesse público; e (v) a diversificação das fontes de recursos nacionais e internacionais.

Como parte de sua agenda de articulação com diversos atores, o BNDES visa ampliar suas iniciativas de apoio às políticas públicas e suas participações em fóruns e eventos sobre mudanças climáticas. Em 2023, o Banco contribuiu fortemente para o Plano de Transformação Ecológica, o Plano Clima, a política industrial Nova Indústria Brasil, o Projeto de Lei do Mercado de Carbono (PL 2.148/2015) e a discussão sobre a taxonomia brasileira. Além disso,

o BNDES participou de planos e fóruns específicos para transição energética, hidrogênio e indústria de baixo carbono, além de ter estado presente na 28ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (COP 28), no G20 e na Cúpula da Amazônia.

As próximas subseções detalham a participação ativa do Banco e os instrumentos desenvolvidos com foco na descarbonização da indústria.

Contribuições do BNDES na agenda de descarbonização da política industrial

Em abril de 2023, o Decreto 11.482 de 6.4.2023 reinstituiu o Conselho Nacional de Desenvolvimento Industrial com a finalidade de propor ao Presidente da República a política industrial e demais medidas para promover o desenvolvimento industrial do país. O CNDI é composto pelos titulares de vinte ministérios e pelo presidente do BNDES, além de 21 representantes institucionais da sociedade civil.

O BNDES participou ativamente de toda a discussão para a definição da política. Em conjunto com representantes da Secretaria Executiva do CNDI, da Casa Civil da Presidência da República, do MDIC, do Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), do Ministério da Fazenda (MF), do Ministério do Planejamento e Orçamento (MPO) e da Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), integrou a Coordenação das Ações de Financiamento ao Desenvolvimento Industrial (Grupo de Trabalho de Coordenação do Financiamento).

No âmbito desse conselho, foram elaborados os princípios, missões e objetivos específicos para o desenvolvimento industrial, inseridos na política NIB lançada em julho de 2023, que prevê, ainda, a definição de metas aspiracionais por missão.

A política, orientada por missões, representa uma estratégia destinada a enfrentar desafios identificados pela sociedade. Ela é fundamentada em princípios norteadores e tem como objetivo catalisar investimentos e inovações em diversos setores, promovendo colaborações em sua execução.

A Resolução CNDI 1 de 21.2.2023, que propõe a nova política industrial, elencou seis missões, listadas a seguir. A missão V endereça os esforços de descarbonização da indústria de base.

i. cadeias agroindustriais sustentáveis e digitais para a segurança alimentar, nutricional e energética;

ii. complexo econômico industrial da saúde resiliente para reduzir as vulnerabilidades do Sistema Único de Saúde (SUS) e ampliar o acesso à saúde;

iii. infraestrutura, saneamento, moradia e mobilidade sustentáveis para a integração produtiva e o bem-estar nas cidades;

iv. transformação digital da indústria para ampliar a produtividade;

v. bioeconomia, descarbonização e transição e segurança energéticas para garantir os recursos para as futuras gerações; e

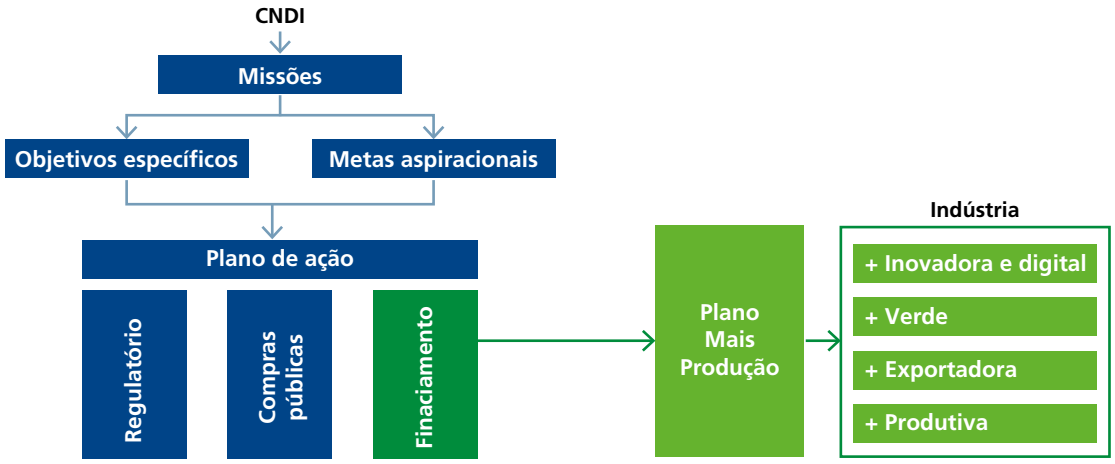
vi. tecnologias de interesse para a soberania e a defesa nacionais.

Em janeiro de 2024, o CNDI apresentou o Plano de Ação da NIB (Brasil, 2024), o qual contempla instrumentos regulatórios, compras públicas e financiamentos. O documento também sugeriu metas aspiracionais por missão. Para a missão V, foram definidas as seguintes metas aspiracionais:

- Promover a indústria verde, reduzindo em 30% a emissão de CO_2 por valor adicionado da indústria, atualmente em 107 milhões de toneladas por trilhão de dólares.
- Ampliar em 50% a participação dos biocombustíveis na matriz energética de transportes, que atualmente é de 21,4%.
- Aumentar o uso tecnológico e sustentável da biodiversidade pela indústria em 1% ao ano, conforme informações registradas no SisGen/MMA.

Nessa ocasião, também foram anunciados R$ 300 bilhões até 2026 para a execução do Plano Mais Produção, principal ação para endereçar o eixo de financiamento da NIB. O plano busca alcançar quatro grandes objetivos, que envolvem ter uma indústria: mais inovadora e digital; mais verde; mais exportadora; e mais produtiva.

FIGURA 25. Plano de ação da Nova Indústria Brasil



Fonte: Elaboração própria.

Instrumentos para incentivar o investimento na descarbonização da indústria

A ampliação do financiamento e o engajamento dos clientes já estão em andamento no BNDES, e a nova abordagem está começando a mostrar resultados. Em 2023, o Banco conseguiu aumentar em 20% a aprovação de operações relacionadas à economia verde em comparação com a média de 2019 a 2022. As aprovações para a indústria aumentaram em 94% em 2023, em relação à média de 2019 a 2022, e em 41% em comparação com o ano anterior. Além disso, houve um aumento significativo nas aprovações para inovações, com um crescimento de 198% em 2023, em relação à média de 2019 a 2022, e de 132% em comparação com o ano anterior.

O ciclo de seminários fez parte da frente de atuação de engajamento dos clientes e, juntamente com interações subsequentes com as empresas, tem proporcionado uma *pipeline* em projetos de investimento na descarbonização da indústria.

Para além dos produtos e linhas de financiamento já existentes, diversos instrumentos foram criados, reforçados ou remodelados de forma a atender às políticas de desenvolvimento do país, no caso do setor industrial, a NIB.

INSTRUMENTOS FINANCEIROS

Programa Fundo Clima

Destinado ao apoio a projetos relacionados à redução de emissões de GEEs e à adaptação às mudanças do clima, é considerado o principal instrumento para financiamento aos esforços de descarbonização.

Em 2023, o Fundo Nacional sobre Mudança do Clima foi reforçado (Novo Fundo Clima) com ampliação dos recursos, com o objetivo de promover vantagens competitivas para o país, emprego verde de qualidade, resiliência climática e diminuição da vulnerabilidade socioambiental e climática da população.

Para isso, em novembro de 2023, o Governo Federal passou a contar com a captação de recursos no valor de US$ 2 bilhões via emissão de título sustentável com base no Arcabouço Brasileiro para Títulos Soberanos Sustentáveis,[74] elaborado pelo Comitê de Finanças Sustentáveis Soberanas (CFSS), órgão colegiado presidido pela Secretaria do Tesouro Nacional do Ministério da Fazenda.

O fundo opera em duas modalidades: recursos para crédito reembolsável, geridos pelo BNDES no âmbito do Programa Fundo Clima, e recursos para apoio não reembolsável, sob res-

74 Disponível em: https://www.gov.br/tesouronacional/pt-br/divida-publica-federal/titulos-sustentaveis. Acesso em: 26 jan. 2024.

ponsabilidade do Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA). Atualmente, tem uma carteira de mais de R$ 2 bilhões em crédito já contratado pelo BNDES.

Conforme o Plano Anual de Aplicação de Recursos 2023-2024 (Paar), definido pelo Comitê Gestor do Fundo Clima, o programa possui seis modalidades: (i) desenvolvimento urbano resiliente e sustentável; (ii) indústria verde; (iii) logística de transporte, transporte coletivo e mobilidade verdes; (iv) transição energética; (v) florestas nativas e recursos hídricos; e (vi) serviços e inovação verdes.

Em linha com o objetivo de manter uma presença ativa e constante do Brasil no mercado internacional de títulos temáticos, o Governo Federal anunciou em junho de 2024 sua segunda captação. Espera-se que o Fundo Clima se beneficie dessa e de novas captações internacionais para manutenção de seu impacto nos próximos anos.

Programa Mais Inovação

Considerando que a descarbonização da indústria exigirá o desenvolvimento de novas tecnologias, destacamos inicialmente o Programa BNDES Mais Inovação.

Lançado pelo BNDES em setembro de 2023, esse programa apoia empresas de todos os portes em projetos de investimento focados em inovação e digitalização e na compra de máquinas e serviços inovadores, utilizando recursos do Fundo de Amparo ao Trabalhador (FAT), remunerados pela taxa referencial (TR), conforme aprovado pela Lei 14.592 de 30.5.2023.

Em termos absolutos, esse investimento está estimado em aproximadamente R$ 5 bilhões por ano até 2026. O programa atualmente conta com[75] três subprogramas, com condições de apoio distintas, quais sejam:

- Investimento em inovação.
- Aquisição de bens inovadores.
- Difusão tecnológica.

Parceria Embrapii e BNDES: Inova+

Ainda no âmbito do apoio à inovação, o BNDES mantém uma parceria com a Embrapii para concessão de recursos não reembolsáveis com o objetivo de promover o desenvolvimento de novas tecnologias e inovações em sete focos temáticos: (i) transformação digital; (ii) economia circular; (iii) materiais avançados; (iv) novos biocombustíveis; (v) bioeconomia florestal; (vi) tecnologias estratégicas do SUS; e (vii) defesa. É importante ressaltar que os temas de economia circular, novos biocombustíveis e bioeconomia florestal estão diretamente alinhados com a agenda de descarbonização da indústria. Os projetos são executados em

75 Para informações atualizadas em relação às linhas e condições de financiamento, consultar o *site* do BNDES.

cooperação entre uma empresa e uma instituição científica e tecnológica credenciada pela Embrapii, que recebe os recursos.

Atuação via mercado de capitais

Apoio por meio de instrumentos de renda variável, pela subsidiária BNDES Participações (BNDESPAR), a empresas brasileiras em todos os estágios de crescimento, com a finalidade de apoiar planos de negócios que estejam de acordo com o planejamento estratégico do Sistema BNDES, inclusive no âmbito da transformação ecológica e da descarbonização. A atuação em renda variável pode se dar por meio de fundos de investimento – Fundo Criatec 4 e GEF Latam Climate Solutions, por exemplo – e de subscrição direta de valores mobiliários, como ações e debêntures conversíveis.

O BNDES irá estruturar fundos de investimentos de mercados de capitais para investimento em pequenas e médias empresas inovadoras no âmbito das missões industriais da NIB. O objetivo é, em conjunto com fundos e investidores privados selecionados pelo BNDES, alavancar o desenvolvimento de setores e tecnologias inovadoras por meio da aplicação de capital de risco em empresas.

Fundo de Investimento em Participação em Minerais Estratégicos

O primeiro dos instrumentos de apoio à indústria mais verde a ser lançado pela BNDESPAR após a divulgação da NIB, o fundo é objeto de edital de seleção pública publicado em maio de 2024 e deverá investir em pesquisa, desenvolvimento, implantação ou retomada de minas de minerais para transição energética e descarbonização e minerais para fertilização do solo.

As companhias-alvo do fundo são as detentoras de títulos minerários ou de direitos sobre recursos minerais, direta ou indiretamente, para mineração de cobalto, cobre, estanho, grafite, lítio, manganês, metais do grupo da platina, molibdênio, nióbio, níquel, silício, tântalo, terras raras, titânio, tungstênio, urânio, vanádio, zinco, fosfato, potássio ou outros minerais para promoção de fertilidade de solo. São elegíveis as companhias com sede e operações no Brasil ou entidades com sede no exterior que detenham, no momento do primeiro investimento do fundo, ativos no Brasil que correspondam a 90% ou mais e receita operacional bruta anual de até R$ 300 milhões.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Brasil dispõe de elementos-chave para obter êxito na descarbonização industrial e na transição para economia de baixo carbono, quais sejam:

- Disponibilidade ampla de terras para além do uso para produção de alimentos e manutenção da biodiversidade;
- Alta taxa de crescimento vegetal e capacidade comprovada na produção em escala de biomassa certificada;
- Disponibilidade de água;
- Reservas minerais de alta qualidade, incluindo minério de ferro e minerais críticos para transição energética;
- Matriz energética predominantemente renovável com recursos potenciais em qualidade e quantidade; e
- Capital humano e infraestrutura de ciência e tecnologia.

Dessa forma, o país tem muito potencial para a oferta de soluções climáticas e está bem-posicionado para aproveitar essa conjuntura e atender ao consumo interno e à demanda global por produtos de baixo carbono.

Para que esse cenário se concretize e a vantagem comparativa do país se transforme em vantagem competitiva de mercado, faz-se necessária uma série de ações específicas que visem não apenas aproveitar sua eficiência na produção de baixo carbono, mas também criar valor para os clientes. Essa abordagem estratégica deve combinar investimentos, políticas públicas e iniciativas empresariais.

Conforme demonstrado nas discussões ao longo do ciclo de seminários promovido pelo BNDES, as indústrias de base no Brasil desfrutam de uma posição privilegiada decorrente dos fatores acima indicados e, em geral, apresentam taxas de emissão menores que as dos demais países produtores para as mesmas tecnologias. Esse diferencial decorre tanto das vantagens indicadas quanto de investimentos anteriores para maior eficiência operacional e ambiental.

Apesar dos esforços já realizados por diversas indústrias, há um importante caminho a ser percorrido para atender as metas de reduções e neutralidade de carbono presentes no cenário atual. Os seminários foram fundamentais para prover uma visão consolidada acerca de rotas de descarbonização consideradas de grande potencial para as indústrias de base no Brasil.

QUADRO 7. Sumário de rotas de descarbonização das indústrias de base

SETORES/EIXOS	BIOMASSA	OUTROS SUBSTITUTOS (MATÉRIA-PRIMA OU ENERGIA)	CAPTURA DE CARBONO/ESCOPO 3
Cimento	• Uso de combustíveis alternativos na calcinação (coprocessamento de resíduos e biomassa)	• Adições e substitutos ao clínquer (circularidade e novos insumos)	Tecnologias de CCUS desenvolvidas de forma consorciada entre empresas e setores
Aço	• Expansão de plantas integradas a carvão vegetal • Injeção de biomassa nas ventaneiras de altos fornos e incorporação ao coque de carvão mineral • Processos de autorredução com biomassa em substituição ao carvão mineral	• Disponibilidade de sucata • Gás natural (transição) e hidrogênio verde para redução direta • Nova tecnologia de eletrólise de óxido fundido	
Química/Fertilizantes	• Etanol para produção de poleolefinas verdes • Biomassa em caldeiras para geração de vapor • Biometano para produção de amônia e fertilizantes	• Eletrificação de unidades • Hidrogênio verde para produção de amônia, fertilizantes e metanol • Processamento químico de resíduos (circularidade)	
Celulose e papel	• Substituição de combustíveis fósseis por biomassa nas caldeiras e fornos de cal • Geração de mais valor no aproveitamento integral da biomassa (circularidade – biorrefinaria		Alinhamento de metodologias para reconhecimento de emissões sequestradas por florestas plantadas (avaliação do ciclo de vida do carbono biogênico)
Mineração	• Uso de biocombustíveis no transporte de carga • Biocarbono em processos de aglomeração	• Combustíveis de baixo carbono a partir do hidrogênio verde • Eletrificação (matriz renovável) de operações remotas, substituindo uso de fósseis em equipamentos	• Ofertas de aglomerados a frio (briquete), em substituição à pelotização tradicional intensiva em energia • Atendimento à demanda crescente de minerais críticos para transição energética

Fonte: Elaboração própria.

Cabe destacar o diferencial brasileiro quanto à utilização sustentável da biomassa, substituindo insumos fósseis em diversos setores. No caso da indústria química, essas e outras rotas relacionadas à circularidade integram a visão de desenvolvimento da química verde, oportunidade clara para o setor no país. Como já destacado, a implementação e a velocidade de avanço dessas rotas dependerão diretamente da capacidade de investimento dos agentes no Brasil, o que refletirá as diversas condições que têm se demonstrado necessárias

à luz dos movimentos recentes em âmbito internacional. Diversos países têm implementado políticas robustas que contemplam instrumentos de financiamento e compartilhamento de risco, internalização do custo de carbono via mercado e mecanismos de ajuste de fronteira e demais esforços para impulsionar o desenvolvimento de novas tecnologias e a cooperação internacional.

São políticas fundamentais para superação dos desafios de:

- Viabilização de investimentos transformadores em indústrias com alta ociosidade.
- Intensidade de capital de novas plantas que incorporam tecnologias pouco consolidadas.
- Competitividade de rotas de baixo carbono vis-à-vis rotas consolidadas à base de recursos fósseis.
- Amadurecimento de regulações sobre rotas prioritárias (ex.: hidrogênio e biometano, respectivamente, PL 2.308/2023 e PL 528/2020).
- Disponibilidade, sustentabilidade e custo de materiais essenciais.
- Aprendizado tecnológico e desenvolvimento de novas rotas.

O estabelecimento de políticas públicas adequadas, o fortalecimento da agenda de cooperação e parcerias internacionais, o fomento à P&D e a integração de novas tecnologias aos processos, além da conscientização sobre a urgência das mudanças climáticas, são condições necessárias para que o país possa superar esses desafios em prol da ampliação dos investimentos. Somente assim o Brasil poderá consolidar uma posição de liderança na agenda de descarbonização da economia e contribuir de forma efetiva para a construção de um futuro mais sustentável e resiliente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÅHMAN, Max. *Unlocking the "hard to abate" sectors*. Washington, DC: WRI, 2020.

AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL. *2019 guide to the business of chemistry*. Washington, DC: ACC, 2019.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. *Hidrogênio de baixo carbono*: oportunidades para o protagonismo brasileiro na produção de energia limpa. Rio de Janeiro: BNDES, 2022.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. *Diretrizes do BNDES para mudança climática*: compromissos e desafios para uma transição justa. Rio de Janeiro: BNDES, 2023.

BOSTON METAL DO BRASIL. *Sumário Corporativo*. Boston Metal: Coronel Xavier Chaves, 2023. Disponível em: https://br.bostonmetal.com/wp-content/uploads/2024/09/Boston-Metal-Brasil-Sumario-Corporativo-20240927.pdf. Acesso em: 12 nov 2023.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. *Plano de ação para a neoindustrialização 2024-2026*. Brasília, DF: MDIC, 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. *Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação à Mudança do Clima na Mineração*: Plano de Mineração de Baixa Emissão de Carbono (Plano MBC). Brasília, DF: MME, 2013.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. *Diretrizes para uma estratégia nacional para neutralidade climática*. Brasília, DF: MMA, [2022]. Disponível em: https://agroicone.com.br/wp-content/uploads/2021/11/Diretrizes-para-uma-estrategia-nacional-para-neutralidade-climatica.pdf. Acesso em: 5 nov. 2023.

BRASKEM e Siemens estabelecem parceria para melhorar eficiência energética no ABC paulista. *Braskem*, [s.l.], 13 fev. 2019. Disponível em: https://www.braskem.com.br/detalhe-noticia/braskem-e-siemens-estabelecem-parceria-para-melhorar-eficiencia-energetica-no-abc-paulista. Acesso em: 5 nov. 2023.

CARVALHO, Pedro Sérgio Landim de; MESQUITA, Pedro Paulo Dias; MELO, Luciane. Mineração. In: BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. *Panoramas setoriais*: mudanças climáticas. Rio de Janeiro: BNDES, 2016. p. 40-45.

CEBRI – CENTRO BRASILEIRO DE RELAÇÕES INTERNACIONAIS *et al*. *Programa de transição energética*. Rio de Janeiro: Cebri, 2021. Disponível em: https://www.cebri.org/media/documentos/arquivos/Apresentacao_PTE.pdf. Acesso em: 26 nov. 2023.

CEBRI – CENTRO BRASILEIRO DE RELAÇÕES INTERNACIONAIS *et al*. *Neutralidade de carbono até 2050*: cenários para uma transição eficiente no Brasil. Relatório final da cooperação técnica ATN/OC-17965-BR. Rio de Janeiro: Cebri, 2023.

CEBDS – CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. *Roadmap:* os caminhos do setor empresarial brasileiro na transição energética nacional. Rio de Janeiro: Cebds, 2023.

CONFEDERATION OF EUROPEAN PAPER INDUSTRIES. *Monitoring report 2021*. Bruxelas: Cepi, 2022.

COWIE, Annette L. *et al*. Applying a science-based systems perspective to dispel misconceptions about climate effects of forest bioenergy. *Global Change Biology Bioenergy*, Oxford, v. 13, n. 8, p. 1210-1231, 2021. DOI: https://doi.org/10.1111/gcbb.12844.

CRU – Commodities Research Unit Group. Fundamental shifts to DRI/HBI trade flows expected due to global steel decarbonisation. *Knowledge and Insights*, London, 10 abr. 2024. Disponível em: https://www.crugroup.com/knowledge-and-insights/insights/2024/fundamental-shifts-to-dri-hbi-trade-flows-expected-due-to-global-steel-decarbonisation/. Acesso em: 12 abr. 2024.

DEL RIO, Dylan D. Furszyfer *et al*. Decarbonizing the pulp and paper industry: a critical and systematic review of sociotechnical developments and policy options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Amsterdam, v. 167, p. 1-13, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112706.

DIAS, Victor Pina; FERNANDES, Eduardo. Fertilizantes: uma visão global sintética. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, n. 24, p. 97-138, set. 2006. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2657/1/BS%2024%20Fertilizantes_Uma%20Vis%c3%a3o%20Global%20Sint%c3%a9tica_P.pdf. Acesso em: 20 nov. 2023.

EICHLER, Paulo *et al*. Produção do biometanol via gaseificação de biomassa lignocelulósica. *Química Nova*, São Paulo, v. 38, n. 6, p. 828-835, 2015. https://doi.org/10.5935/0100-4042.20150088

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanço Energético Nacional*. Ano base 2022. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2023a. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf . Acesso em: 5 nov. 2023.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Captura e armazenamento de carbono biogênico*: Bio-CCS. Rio de Janeiro: EPE, 2023c. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-767/FS-EPE-DPG-SDB-2023-05-BioCCS.pdf. Acesso em: 26 jan. 2024.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Estudos do plano decenal de expansão de energia 2032*: demanda e eficiência energética. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2023b. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-689/topico-640/Caderno%20de%20Efici%C3%AAncia%20e%20Demanda%20-%20PDE%202032%20final_20230313.pdf. Acesso em: 26 jan. 2024.

EU COMISSION – EUROPEAN COMISSION. Carbon border adjustment mechanism: a new, green way of pricing carbon in imports to the EU. Beijing: EU Commission, 2023.

FERTILIZANTES: processo produtivo e considerações ambientais. *Propeq*, São Paulo, 24 set. 2020. Disponível em: https://propeq.com/fertilizantes/. Acesso em: 22 nov. 2023.

GABRIELLI, Paolo *et al*. Net-zero emissions chemical industry in a world of limited resources. *One Earth*, Cambridge, v. 6, n. 6, p. 682-704, 2023. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590332223002075. Acesso em: 14 jan. 2024.

GREENHOUSE GAS PROTOCOL. *Global warming potential values*. Washington, DC: Greenhouse Gas Protocol, 2016. Disponível em: https://ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20(Feb%2016%202016)_1.pdf. Acesso em: 26 nov. 2023.

GROSS, Samantha. *The challenge of decarbonizing heavy industry*. Washington, DC: Brookings, 2021. Disponível em: https://www.brookings.edu/articles/the-challenge-of-decarbonizing-heavy-industry/. Acesso em: 22 ago 2023.Acesso em: 31 ago. 2023.

HASANBEIGI, Ali. *Steel climate impact*: an international benchmarking of energy and CO_2 intensities. St. Petersburg, FL: Global Efficiency Intelligence, 2022.

HEINE, D., *et al*. *Financing low-carbon transitions through carbon pricing and green bonds*. Washington, DC: The World Bank, 2019. (Policy research working paper, 8991).

HYBRIT. HYBRIT demonstration. *HYBRIT*, Estocolmo, 14. jul. 2022. Disponível em: https://www.hybritdevelopment.se/en/hybrit-demonstration/. Acesso em: 26 jul. 2024.

IABR – INSTITUTO AÇO BRASIL. *A indústria do aço está e continuará colaborando para minimizar os impactos sobre a mudança do clima*. Rio da Janeiro: IABr, 2021.

IBÁ – INDUSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. *Relatório anual 2018*. São Paulo: IBÁ, 2018.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. *Relatório anual 2023*. São Paulo: IBÁ, 2023.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. *II Inventário de gases estufa do setor mineral*. Brasília, DF: Ibram, 2014. Disponível em: https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/00005153.pdf. Acesso em: 12 nov. 2023.

ICFPA – INTERNATIONAL COUNCIL OF FOREST AND PAPER ASSOCIATIONS. Carbon neutrality of biomass, *ICFPA* 2022. Policy Statement. Disponível em: https://icfpa.org/wp-content/uploads/2022/01/ICFPA-Policy-Statement-Carbon-Neutrality-of-Biomass-January-2022.pdf. Acesso em: 7 dez. 2023.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Chemicals. *IEA*, Paris, 11 jul. 2023. Disponível em: https://www.iea.org/energy-system/industry/chemicals. Acesso em: 22 nov. 2023

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Iron and steel technology roadmap*: towards more sustainable steelmaking. Paris: IEA, 2020b.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Sustainable supply potential and costs*. *In*: IEA. *Outlooks for biogas and biomethane*: sustainable supply potential and costs. Paris: IEA, 2020c. p. 24-39.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. The challenge of reaching zero emissions in heavy industry. *IEA*, Paris, 19 set. 2020a. Disponível em: https://www.iea.org/articles/the-challenge-of-reaching-zero-emissions-in-heavy-industry. Acesso em: 22 set. 2023.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Summary for policymakers. *In*: CORE WRITING TEAM; LEE, Hoesung; ROMERO, José (eds.). *Climate change 2023*: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2023. p. 1-34. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf. Acesso em: 14 fev. 2024.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Summary for policymakers. *In*: MASSON-DELMOTTE, V. *et al*. (eds.). *Global warming of 1.5°C*: special report. Geneva: IPCC, 2018.

MELLO, Adriana; SOTO, Jorge; VIVEIRO, José Augusto. *Polímeros verdes*: tecnologia para promoção do desenvolvimento sustentável. Santiago de Chile: Cepal, 2020. Disponível em: https://archivo.cepal.org/pdfs/bigpushambiental/Caso6-PolimerosVerdes.pdf. Acesso em: 22 out. 2023.

METHANOL INSTITUTE. *Renewable methanol report*. Washington, DC: Methanol Institute, 2018.

MOURÃO, Marcelo Breda (coord.). *Introdução à siderurgia*. São Paulo: ABM, 2007.

MOYA, Wahome *et al*. Fundamental shifts to DRI/HBI trade flows expected due to global steel decarbonisation. *CRU*, Londres, 10 abr. 2024. Disponível em: https://www.crugroup.com/knowledge-and-insights/insights/2024/fundamental-shifts-to-dri-hbi-trade-flows-expected-due-to-global-steel-decarbonisation/. Acesso em: 10 abr. 2024.

NOLDIN JÚNIOR, José Henrique *et al*. Tecnored: the first full scale furnace. *In*: AISTECH 2005 – THE IRON AND STEEL TECHNOLOGY CONFERENCE AND EXPOSITION, 2005, Charlotte. Charlotte: AIST, 2005.

NORDHAUS, William. Climate clubs: Overcoming free-riding in international climate policy. *American Economic Review*, Nashville, v. 105, n. 4, p. 1339-1370, 2015.

PARRY, Ian; BLACK, Simon; ROAF, James. *Proposal for an international carbon price floor among large emitters*: IMF staff climate notes. Washington, DC: FMI, 2021.

RISSMAN, Jeffrey *et al*. Technologies and policies to decarbonize global industry: review and assessment of mitigation drivers through 2070. *Applied Energy*, Barking, v. 266, p. 1-34, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114848.

SANTOS, Achiles Tolomei Souza dos *et al*. Materiais refratários para altos-fornos a carvão vegetal. *In*: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS, 39.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO, 10., 2009, Ouro Preto. *Anais* […]. São Paulo: ABM, 2009. p. 1086-1097.

SEEG – SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. *Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil*: 1970-2022. [S.l.]: Observatório do Clima, 2023. Disponível em: https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2024/02/SEEG11-RELATORIO-ANALITICO.pdf. Acesso em: 3 set. 2024.

SEMMLER, W *et al*. *Fiscal Policies for a Low-Carbon Economy*. Washington, DC: World Bank Group, 2021.

SOLIMAN, T.; FLETCHER, L.; CROCKER, T. *Digging deep*: Which miners are facing up to the low-carbon challenge? Londres: CDP, 2017.

TEIXEIRA, Cássio Adriano Nunes *et al*. A hora do biometano no Brasil. Rio de Janeiro: BNDES, 2024. (Textos para Discussão, n. 159).

UNECE – UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE. *Technology brief*: carbon neutral energy intensive industries. Geneva: Unece, 2022.

UNIDO – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. *Produção de combustíveis líquidos a partir de biogás e biometano:* nota técnica. Brasília, DF: Unido, 2022.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. *Industrial decarbonization roadmap*. Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2022.

VALE ANUNCIA "briquete verde" que pode reduzir em até 10% as emissões de CO_2 de clientes siderúrgicos. *Vale*, Rio de Janeiro, 9 set. 2021. Disponível em: https://saladeimprensa.vale.com/pt/w/vale-announces-green-briquette-capable-of-reducing-co2-emissions-of-steelmaking-clients-by-up-to-10-?. Acesso em: 5 nov. 2023.

VALE ASSINA acordos para desenvolver mega hubs no Oriente Médio e prover soluções de descarbonização para siderurgia. *Vale*, Rio de Janeiro, 1 nov. 2022. Disponível em: https://saladeimprensa.vale.com/pt/w/vale-signs-agreements-to-develop-mega-hubs-in-the-middle-east-and-provide-decarbonization-solutions-for-steelmaking-1. Acesso em: 26 jan. 2024.

VALE AVANÇA em projeto pioneiro para a adoção de combustíveis de baixo carbono na navegação. *Vale*, Rio de Janeiro, 30 jun. 2022. Disponível em: https://vale.com/pt/w/vale-advances-a-pioneering-project-to-adopt-low-carbon-fuels-in-shipping. Acesso em: 26 jan. 2024.

VERCAMMEN, Steven. Steel. *McKinsey Quarterly*, Nova York,1 ago. 2022. Disponível em: https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/spotting-green-business-opportunities-in-a-surging-net-zero-world/transition-to-net-zero/steel. Acesso em: 23 ago. 2023.

VIDAL, André Carvalho Foster; HORA, André da. A atuação do BNDES nos setores de florestas plantadas, painéis de madeira, celulose e papéis: o período 2001-2010. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, n. 32, p. 133-172, 2011.

VISEDO, Gonzalo; PECCHIO, Marcelo (coord.). *Roadmap tecnológico do cimento:* potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro: SNIC, 2019.

WANG, R.R. *et al*. Hydrogen direct reduction (H-DR) in steel industry—An overview of challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, Amsterdam, v. 329, 20 dez. 2021. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965262103972X. Acesso em: 12 nov. 2023.

WORLD ECONOMIC FORUM. *Net-zero industry tracker 2023*. Geneva: World Economic Forum, 2023.

WORLD STEEL ASSOCIATION. *Energy use in the steel industry*. Bruxelas: World Steel, 2021.

WORLD STEEL ASSOCIATION. *Sustainability indicators 2023 report*: sustainability performance of the steel industry 2004-2022. Bruxelas: World Steel, 2023.

AUTORES
Patrícia Dias Fernandes
Pedro Paulo Dias
Joao Paulo Carneiro de Holanda Braga*
Rodrigo Mendes Leal de Souza

COORDENAÇÃO
Flávio Moraes da Mota
Claudia Pimentel Trindade Prates

CONTRIBUIÇÃO
Andre Albuquerque Sant'Anna
Rodrigo Jose Marcio Campos Silva Mendes
Eduardo Delmonte Ermakoff
André Biazus
João Paulo Cotta da Silva
Maria Clara Rizzi Mendes
Melissa Pires do Rio de Araujo Cabral

EDIÇÃO
Gabinete da Presidência
Departamento de Comunicação
Gerência de Editoração e Memória

Gerente
Luisa de Carvalho e Silva

Coordenação editorial
Fernanda Costa e Silva

Copidesque e revisão
Tikinet

Projeto gráfico e diagramação
Refinaria Design

** Contribuiu enquanto atuava no Departamento de Clima do BNDES*

Editado pelo Departamento de Comunicação do Gabinete da Presidência

Novembro de 2024

BNDES

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
UNIÃO E RECONSTRUÇÃO