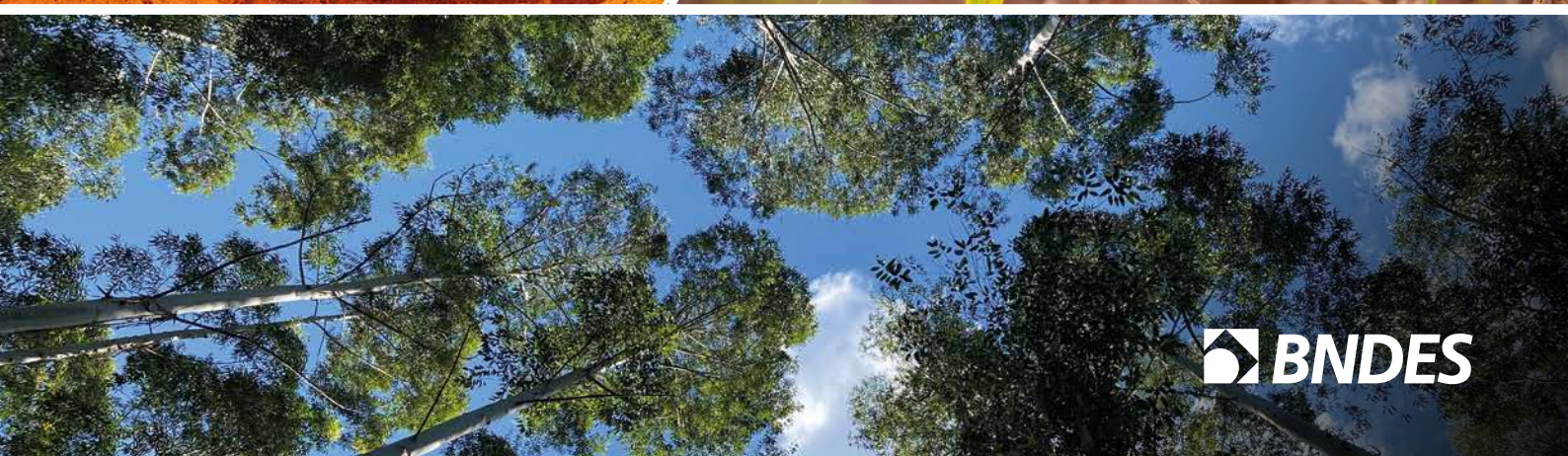




DESCARBONIZAÇÃO DA INDÚSTRIA DE BASE

SUMÁRIO EXECUTIVO



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

ROTAS E DESAFIOS PARA A DESCARBONIZAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DE BASE NO BRASIL

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 da política Nova Indústria Brasil (NIB) e no Plano de Transformação Ecológica (PTE).

Com o intuito de contribuir ativamente para a agenda de transição para uma economia de baixo carbono e aprofundar o entendimento sobre as iniciativas e necessidades da indústria, o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) sediou, em 2023, um ciclo de seminários sobre a descarbonização das indústrias de base. Entre maio e outubro daquele ano, 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 – notadamente com o Conselho Nacional de Desenvolvimento Industrial (CNDI), do Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC), e a Secretaria de Relações Institucionais da Presidência da República – e a academia.

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

Expressamos nosso sincero agradecimento aos presidentes das entidades parceiras, representantes de governo e a todos que se dedicaram a esse tema marcado pelo senso de urgência. Suas valiosas contribuições foram fundamentais para a criação de um material que busca promover o diálogo e orientar ações voltadas para uma indústria de base de baixo carbono.

Este sumário executivo apresenta de forma sucinta os principais temas abordados no trabalho. Recomendamos a leitura da versão integral do documento, que inclui cenários de neutralidade climática para o Brasil e políticas de descarbonização adotadas mundialmente, bem como descrições aprofundadas de rotas, desafios e experiências de descarbonização por setor.

INTRODUÇÃO

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

O desenvolvimento industrial, a infraestrutura e a urbanização foram construídos a partir de 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 nosso dia a dia: seus produtos são necessários para viabilizar alimentação, combustíveis, geração de energia, equipamentos, veículos, edifícios, produtos eletrônicos, plásticos, embalagens de papel, entre outros exemplos cotidianos.

A indústria de base ainda contribui com a geração de empregos bem remunerados e o 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 não apenas para o desenvolvimento dos diversos setores a jusante como para a economia como um todo.

Entretanto, 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 forte emissora de gases de efeito estufa (GEE).

A dependência da sociedade atual de produtos originados na indústria de base é um dos fatores que contribui para tornar o abatimento de suas emissões de GEEs de particular dificuldade (*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 aumenta. Logo, evitar o aumento das emissões de GEEs depende de reduzir a intensidade carbônica¹ de seus produtos.

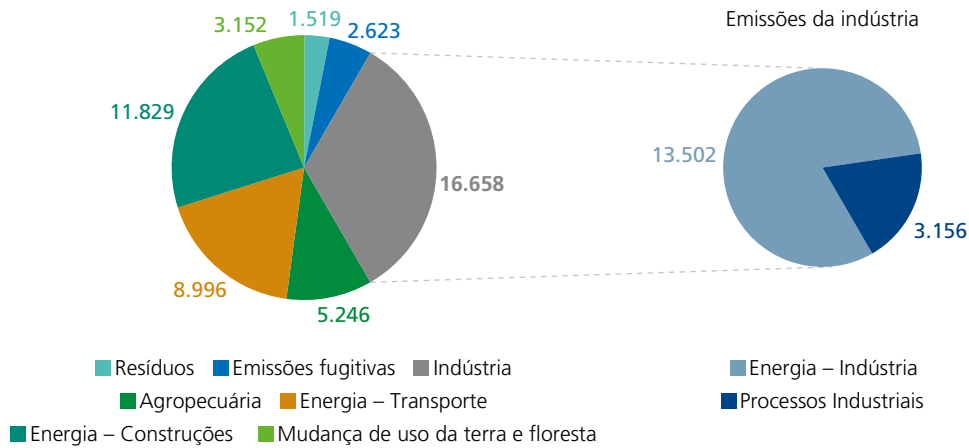
Segundo Rissman e outros (2020),² os setores industriais foram responsáveis por 33% das emissões globais de GEEs, totalizando 16.658 milhões de toneladas (Mt) de CO₂e (Gráfico 1). Desse montante, 19% (equivalente a 3.156 MtCO₂e) originaram-se diretamente dos pro-

¹ A intensidade carbônica é uma medida relativa que apresenta a quantidade total de emissões de GEEs associadas à produção de uma quantidade de determinado produto, em geral é expressa em termos de toneladas de dióxido de carbono equivalente por tonelada de produto (tCO₂e/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 aos do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (Seeg) – plataforma do Observatório do Clima que apresenta estimativas anuais das emissões de GEEs no país. Essa semelhança permite a comparação entre os perfis de emissão mundial e brasileiro.

cessos produtivos industriais, enquanto os 81% restantes (13.502 Mt 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 (Tabela 1). Em relação à totalidade das fontes emissoras, a indústria de base representou aproximadamente 24% das emissões globais. Esses números por si sós justificam a atenção global dedicada à descarbonização dessas 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	5,6
Química	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).

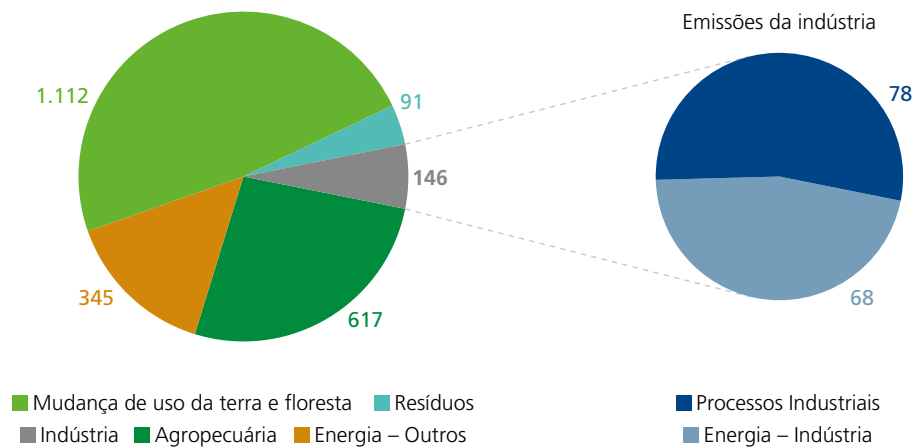
*Somatório da classificação original “cimento” e “cal”.

**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 representou 6,3% das emissões de GEEs do país, alcançando um total de 146 Mt de CO2e emitidas. Dentro desse cenário, a indústria de base foi responsável por aproximadamente 67% das emissões totais do setor industrial (Tabela 2 e Gráfico 2).

³ Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/>. Acesso em: 20 fev. 2024.

GRÁFICO 2. Emissões brasileiras de GEEs em MtCO2e – 2022



Fonte: Elaboração própria com base nos dados do Seeg. 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	1,5
Química	16	10,8	0,7
Outros	49	33,5	2,1

Fonte: Elaboração própria com base nos dados do Seeg. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/>. Acesso em: 20 fev. 2024.

Se, por um lado, a indústria de base tem o desafio de reduzir emissões, por outro, ela fornecerá muitos dos principais insumos necessários para uma transição sustentável (IEA, 2020). 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.

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.

Ao longo do ciclo de Seminários sobre a Descarbonização das Indústrias de Base realizado pelo BNDES em 2023, 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 é um resumo executivo que foi elaborado com base no material apresentado pelas entidades representativas e empresas participantes.

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

Com exceção das indústrias de base florestal e de mineração,⁴ os demais setores das indústrias 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 em energia. A descarbonização dessas indústrias demanda soluções tanto no setor de infraestrutura e energia quanto na própria indústria.

Alguns processos de produção das indústrias *hard-to-abate* são particularmente críticos: a fabricação de cimento requer a calcinação de calcário em fornos a altas temperaturas, liberando CO₂ 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, que consome grandes volumes de carvão metalúrgico e gera emissões substanciais de CO₂ como parte do processo; na indústria química, vários processos, como a produção de amônia, etileno e metanol, liberam CO₂ como subproduto ou parte do processo de síntese, o que se aplica também à indústria de fertilizantes.

Já as indústrias de mineração e de base florestal 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,⁵ os setores *hard-to-abate* ainda enfrentam fatores econômicos igualmente desafiadores. Há uma demanda por investimentos substanciais em infraestrutura, tecnologias inovadoras e mudanças operacionais que podem ser economicamente custosas 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,⁶ que não necessariamente estão sujeitos às mesmas preocupações com a pegada de carbono.

Resumindo: se a indústria de base tem um grande desafio para reduzir emissões, contemplando os setores considerados de difícil abatimento (*hard-to-abate*), por outro lado, seus produtos são

⁴ No caso da mineração, conforme será detalhado, o desafio da descarbonização está no escopo 3, justamente por conta dos processos metalúrgicos e de refino da etapa de transformação.

⁵ É muitas vezes difícil encontrar substitutos viáveis – igualmente eficientes em termos de custo e desempenho – para processos que exigem altos níveis de temperatura, pressão ou eletricidade.

⁶ O setor de cimento é uma exceção quanto à concorrência com produtos importados de maiores emissões de GEEs, por seu mercado ser majoritariamente doméstico.

essenciais para alcançar a neutralidade de carbono de uma forma geral, inclusive na medida em que serão necessários para o desenvolvimento de novos materiais fundamentais para a transformação e a adaptação climática. Não se deve esquecer, ainda, que para que a transição climática ocorra, faz-se necessário olhar toda a economia com coordenação entre diferentes setores, mobilização de recursos e uso complementar de instrumentos públicos e privados.

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

Os produtos das indústrias de base são essenciais à transição climática, contribuindo para edificações resilientes e com baixa pegada de carbono, infraestruturas de energia renovável, eletrificação, entre outros. 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 3.⁷

Na **indústria siderúrgica**, antecipa-se uma preferência e 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 a transporte e fabricação. A relevância do aço leve e resistente é notável tanto para a construção civil quanto para otimizar a eficácia de veículos elétricos. No âmbito da mobilidade, a demanda será proveniente tanto dos veículos elétricos quanto das infraestruturas associadas à eletrificação, tais como as estações de carregamento.

No setor de energia, a contribuição do aço está na infraestrutura de energia renovável, como turbinas eólicas, estruturas de suporte para painéis solares e composição de 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.

Quanto à **indústria de cimento**, o desenvolvimento de novos produtos desempenha papel importante 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 isolamento térmico, serão de extrema importância. Tais propriedades não apenas fortalecem a resiliência estrutural, mas também contribuem para a eficiência energética, a rápida reconstrução e a adaptação a variáveis climáticas desafiadoras.

⁷ Emissões geradas por clientes e fornecedores, exceto o fornecimento de energia, que é definido como escopo 2.

A **indústria de fertilizantes** pode contribuir para a descarbonização na medida em que a nutrição de plantas aumenta a produtividade agrícola ou 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 um importante consumidor de resíduos orgânicos, transformados em bioinsumos – caso dos fertilizantes organominerais.

A **indústria de mineração** provê fertilizantes essenciais para a produtividade agrícola, como 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 são considerados minerais estratégicos ou críticos por diversos países e instituições, por apresentarem reservas consideradas não abundantes diante do crescimento projetado da demanda ou concentradas em poucos países sujeitos a intervenções de ordem geopolítica potencialmente causadoras de rupturas de fornecimento.

A **indústria química** conta com diversas iniciativas promissoras para contribuir na 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 redução de emissões de CO₂.⁸ Em um estágio posterior, o uso do hidrogênio de baixo ou zero carbono na produção de químicos, tais 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, a fim de obter processos mais eficientes e reduzir gasto energético e perdas. Cumpre ainda citar novas rotas, tais como a produção de químicos a partir da biomassa, a exemplo de plásticos renováveis, e a rota de reciclagem química, uma abordagem inovadora na gestão de resíduos plásticos, possibilitando a decomposição desses materiais em monômeros ou compostos reutilizáveis. Essa estratégia tanto fomenta a reutilização de materiais como reduz a necessidade de recursos virgens.

A **indústria de base florestal** no Brasil, uma importante produtora de biomassa, é um pilar na construção da bioeconomia. O país se destaca por sua competitividade nessa área, 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: geração de energia, como na produção de combustíveis à base de lignina; substituição de ma-

⁸ A queima do gás natural produz menos emissões de CO₂ por unidade de energia gerada, contribuindo para a redução das emissões totais de carbono na atmosfera.

térias-primas à base de carbono fóssil, como na fabricação de plásticos de celulose; material de construção; entre outras. Além desses benefícios, é importante ressaltar o significativo sequestro e armazenamento de carbono proporcionado pela indústria ao substituir áreas degradadas por florestas cultivadas.

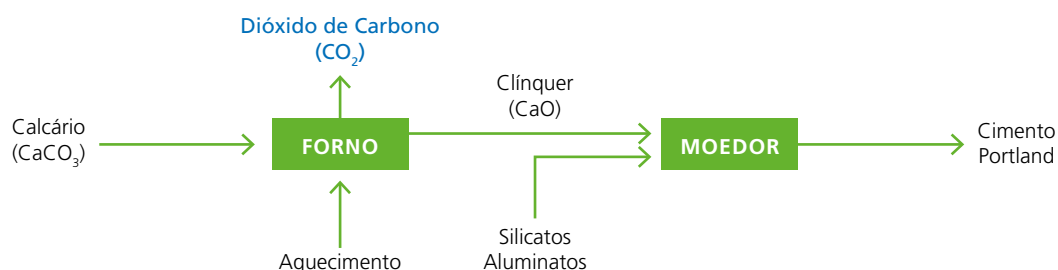
ROTAS PARA A DESCARBONIZAÇÃO POR SETOR

Nesta seção, examinaremos os cenários prospectivos conforme apresentados pelos setores de cimento, aço, mineração, química, fertilizantes e base florestal durante o 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 singulares.

Indústria de cimento

O cimento é um agente ligante, que, combinado com agregados como areia e brita, e água, forma o concreto. O concreto é o segundo material mais usado globalmente após a água. 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, onde o calcário (CaCO_3) é decomposto em cal (CaO) e dióxido de carbono (CO_2). O CO_2 é liberado para a atmosfera, enquanto a cal reage com a sílica (SiO_2), a alumina (Al_2O_3) e o óxido de ferro (Fe_2O_3), formando o clínquer (Rissman *et al.*, 2020). Esse processo está descrito na Figura 1.

FIGURA 1. Processo simplificado de produção do cimento



Fonte: Adaptado de Gross (2021).

Em escala mundial, aproximadamente 90% das emissões de CO₂ oriundas da fabricação de cimento ocorrem durante a produção de clínquer,⁹ 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.¹⁰

Em termos mundiais, a indústria de cimento é responsável por cerca de 20 a 27% das emissões industriais de GEEs e por 6% das emissões totais (Rissman *et al.*, 2020; Unece, 2022). No Brasil, de acordo com dados do Seeg referentes a 2022, 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 CO₂ por tonelada de cimento produzido (Roadmap, 2019). Segundo *site* da International Energy Agency (IEA),¹¹ a média mundial de emissão específica vem se mantendo constante – 580 kg CO₂/t de cimento – desde 2018. Para atingir o cenário de emissões líquidas zero,¹² a indústria de cimento deve diminuir anualmente suas emissões a uma taxa de 3 a 4% de modo a alcançar uma emissão específica de 450 kgCO₂/t em 2030 e de 375 kgCO₂/t em 2050.

Rotas de descarbonização na indústria de cimento

Dado o forte impacto ambiental dessa indústria, é fundamental selecionar estratégias de mitigação que possam contribuir para a produção sustentável de cimento. Segundo o estudo *Roadmap Tecnológico do Cimento* (Roadmap, 2019), são três os principais pilares que respondem 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 também em pesquisa e desenvolvimento (Figura 2).

No Brasil, conforme estimado pelo estudo do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (Snic) de 2019, reduzir a 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 redução das emissões da indústria.

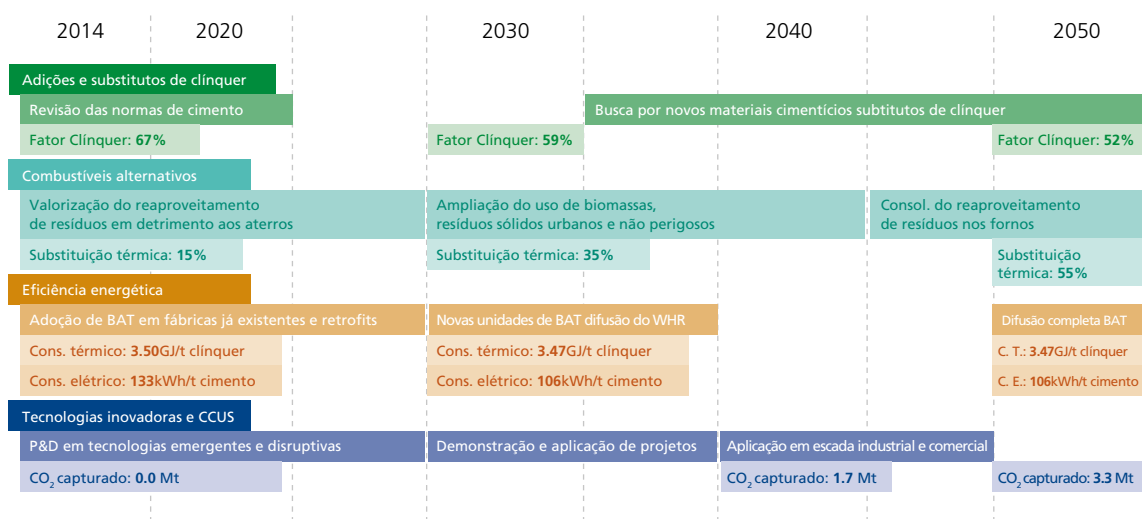
9 Decompondo as emissões da produção do cimento, temos 50% advindas da matéria-prima, 40%, dos combustíveis, 5%, do transporte e 5%, do consumo elétrico.

10 Dados com base na apresentação do Snic realizada em 25.5.23 no Seminário de Descarbonização da Indústria de Cimento no BNDES.

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

12 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.

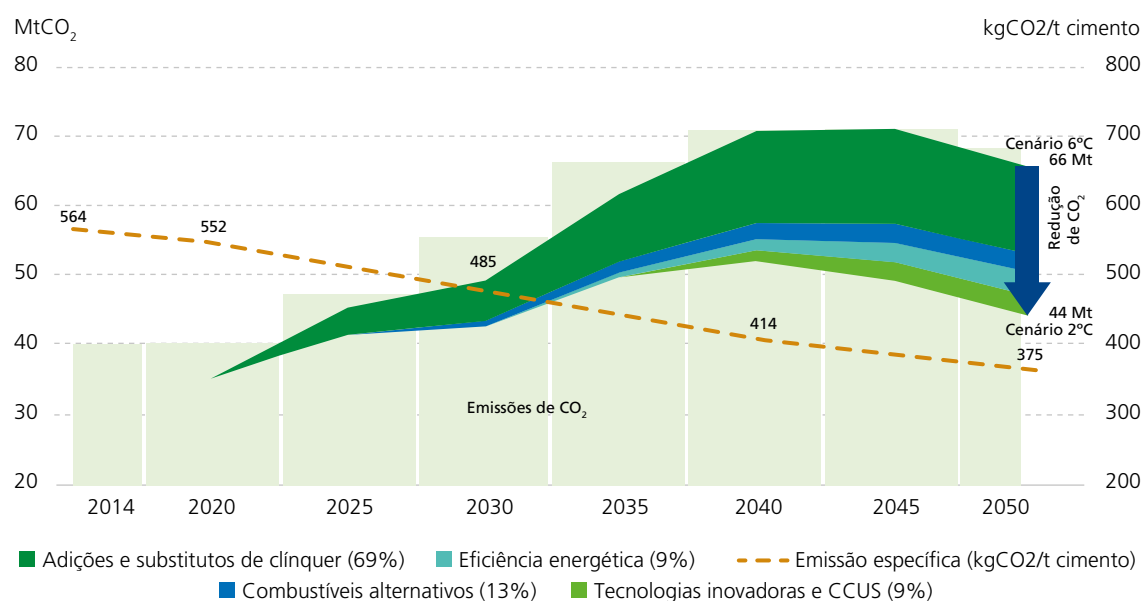
FIGURA 2. Rotas para redução das emissões de CO₂ na indústria brasileira de cimento



Fonte: Adaptado de Roadmap, 2019.

O gráfico a seguir resume a contribuição dos três pilares de descarbonização detalhados acima, além das tecnologias inovadoras e da captura, utilização e armazenamento (CCUS, do inglês carbon capture, utilization and storage). O trabalho analisa uma redução de 33% na intensidade carbônica entre 2019 e 2050 (Gráfico 3).

GRÁFICO 3. Redução de emissões diretas de CO₂



Fonte: Roadmap 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 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 fazem dele um material essencial para a produção de estruturas, maquinários, veículos, e mais. Ainda que fundamental para a economia global moderna, sua produção é caracterizada por 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.¹³ Assim, a produção de uma tonelada de aço bruto resulta, em média, na emissão direta de 1,4 tonelada de CO₂e e 0,6 tonelada de emissões indiretas de CO₂e.¹⁴

No Brasil, a produção de ferro e aço foi responsável por 46 milhões de toneladas de CO₂e¹⁵ emitidas em 2020, o equivalente a cerca de 2% do total de emissões do país, segundo dados do Seeg.

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 redução¹⁶ do minério de ferro, principal fonte de insumo metálico nos altos-fornos (*blast furnace* – BF), tendo o carvão (mineral ou vegetal) como agente redutor.

13 Emissões totais do setor energético incluindo emissão de processo.

14 Em termos gerais, os valores divulgados pela IEA e pela Worldsteel (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 Worldsteel 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, usaremos os dados dessa instituição. Os grupos de partes interessadas na 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 Associação Mundial do Aço (Worldsteel), uma instituição global do setor. Normas como a ISO 14404 e o BREF da Comissão Europeia também são referências importantes (IEA, 2020b).

15 Os gases de efeito estufa, incluindo CO₂, CH₄, N₂O, PFC, HFC e SF₆, são convertidos em CO₂e ou CO₂ equivalente, usando a métrica GWP-100 do AR5, quinto relatório de avaliação do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). A métrica de conversão para dióxido de carbono é equivalente à do 6º relatório de avaliação do IPCC (2023).

16 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 presente no minério de ferro se combine com o carbono do agente redutor, formando dióxido de carbono e liberando ferro metálico, que segue para laminação.

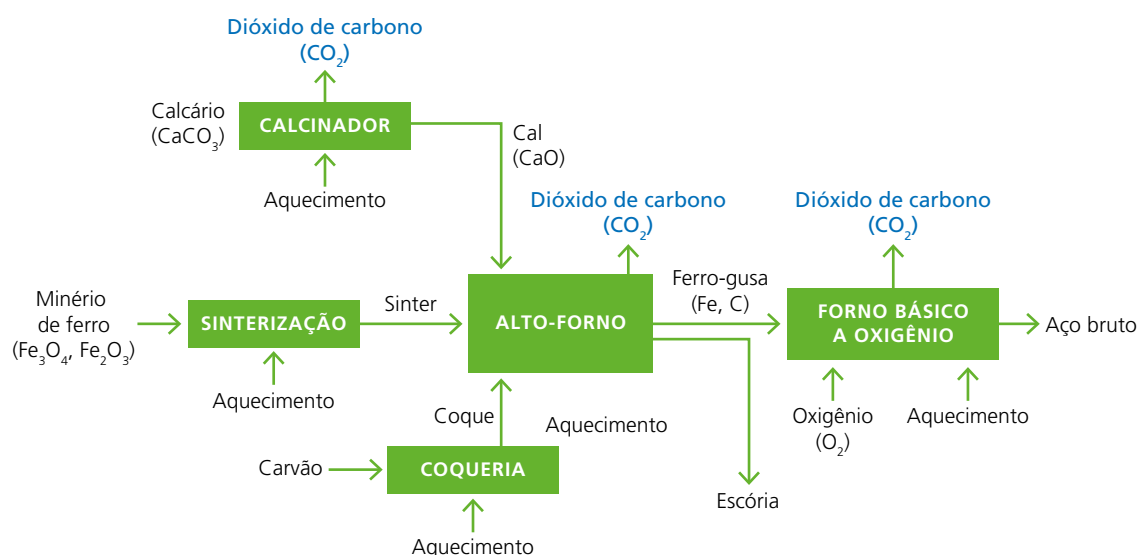
O resultado da redução é o ferro-gusa que segue para refino em um conversor a oxigênio (*basic oxygen furnace* – BOF) para posterior laminação. Cabe ressaltar que o carvão vegetal somente é usado em altos-fornos de menor capacidade.

Os produtores de usinas semi-integradas operam apenas duas etapas do processo siderúrgico: refino e laminação. Nessa rota, não há a redução, etapa em que o minério de ferro é transformado em ferro-gusa. Na rota semi-integrada, o insumo metálico é a sucata de aço, o ferro-gusa ou o ferro reduzido direto¹⁷ (*direct reduced iron* – DRI) adquiridos de terceiros, que são usados para alimentar a aciaria elétrica, instalação industrial na qual o forno elétrico a arco (*electric arc furnace* – EAF) é o equipamento principal.

De acordo com a IEA (2020b) e conforme ilustrado na Figura 3, cerca de 70% do aço bruto é produzido por meio de rotas integradas¹⁸ (primárias), sendo o restante produzido pela rota semi-integrada (secundária).

Aproximadamente 80% das emissões de GEEs provenientes da produção de aço bruto têm sua 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 papel de agente redutor e de fonte de calor. O dióxido de carbono 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.

FIGURA 3. Processo simplificado da rota integrada da produção de aço via alto-forno



Fonte: Adaptado de Gross (2021).

¹⁷ Também conhecido como ferro-esponja.

¹⁸ 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.

No Brasil, de acordo com dados do Instituto Aço Brasil (IABr),¹⁹ 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).

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 do Instituto Aço Brasil realizada em 11.7.23 no Seminário de Descarbonização da Indústria Siderúrgica no BNDES.

Rotas para 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 do aço. Atualmente, já existem abordagens promissoras para a produção em escala industrial sem a emissão de CO₂, mas não existe uma solução única para a neutralidade das emissões.

Embora a meta de alcançar a neutralidade líquida de carbono esteja definida para 2050, são necessárias ações imediatas. As instalações industriais têm uma vida útil que pode exceder cinquenta anos, e os horizontes de planejamento de investimentos abrangem de 10 a 15 anos. Portanto, as decisões relativas a esses investimentos precisam ser tomadas hoje 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.

O Quadro 1 traz um 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;
	Utilizam carbono como agente redutor, evitando a emissão de CO ₂ fóssil	vi. Autorredução (Tecnored); vii. Captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS);
Rotas baseadas em tecnologias disruptivas	Substituem carbono como agente redutor	viii. Hidrogênio verde (H ₂ v), gerando H ₂ O (água) em vez de CO ₂ ; e ix. Utilização de energia elétrica por meio de um processo baseado em eletrólise.

Fonte: Elaboração própria.

¹⁹ Apresentação realizada pelo IABr em 11.7.2023 no Seminário de Descarbonização da Indústria Siderúrgica no BNDES.

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 solução de longo prazo. As tecnologias disruptivas e menos intensivas em energia e carbono apresentam-se em diferentes estados de maturidade tecnológica e custos de produção.

Indústria de mineração

A indústria de mineração está na base de diversas outras indústrias. Elementos²⁰ como ferro, bauxita, nióbio, manganês, ouro e lítio são extraídos das minas, transformados em minerais industriais e ligas metálicas e utilizados nas indústrias metalúrgica, química, de fertilizantes, de cimento/construção civil, eletrônica, entre outras, 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 Carvalho, Mesquita e Melo (2016), o *II Inventário de gases efeito estufa do setor mineral*, realizado pelo Instituto Brasileiro de Mineração (Ibram), aponta que o total de emissões desse segmento representou 0,9% das emissões brasileiras em 2011. Ainda segundo os autores, o Brasil apresenta, pelas características de suas minas e de sua matriz energética, emissões mais baixas que as de outros países mineradores.

O processo produtivo da mineração se desdobra em três fases distintas. A primeira fase é a pesquisa mineral, que visa descobrir os recursos minerais de interesse no subsolo. Na segunda fase, denominada lavra, ocorre a extração e o transporte do recurso para as instalações de manuseio. 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, ocorrendo posteriormente as alterações químicas e metalúrgicas que caracterizam as indústrias de transformação mineral. Desde a extração até o beneficiamento, predominam processos de transformação mecânica, não resultando em 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. Na fase de pesquisa mineral, não são registradas grandes emissões.

Posteriormente, 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.

20 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% das reservas de nióbio, 22% das de grafite, 16% das de terras raras e 16% das de níquel de todo o mundo.

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 advinda do consumo energético do processo, principalmente durante as etapas de cominuição, peneiramento, concentração e separação de sólidos 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, de acordo com Carvalho e outros (2018), as principais fontes de emissões de GEEs da mineração são: (i) o consumo de energia no beneficiamento; e (ii) o consumo de combustível utilizado no transporte de minério dentro da mina. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Mineração (2014), 90% das emissões de GEEs na mineração resultam dessas atividades.

Rotas de descarbonização na indústria de mineração

Na indústria de mineração, diferentemente do que ocorre em setores como cimento, siderurgia, química e fertilizantes, nos quais 40% a 70% das emissões de GEEs decorrem do processo produtivo, a maior parte das emissões derivam 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 várias medidas, adaptadas às 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 daquelas da cadeia produtiva da indústria de mineração, conforme apontado pelo Transition Pathway Initiative (Dietz *et al.*, 2020). As principais fontes das emissões de escopo 3 na mineração estão associadas ao uso de seus produtos 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, superando o impacto combinado das emissões dos escopos 1 e 2.

Assim, a descarbonização do setor de mineração deve transcender suas fronteiras convencionais por meio de iniciativas que visem a descarbonização das emissões ao longo de toda sua cadeia de valor. 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 *hot briquetted iron* (HBI) e produtos de aço destinados aos mercados locais e transoceânicos, com uma expressiva redução das emissões de CO₂.

O Quadro 2 apresenta um resumo de rotas identificadas para a descarbonização da mineração.

QUADRO 2. Rotas para descarbonização identificadas na indústria de mineração

Rotas de escopo 1 e 2	i. Eficiência energética; ii. Fontes de energia de baixo carbono (biocombustíveis, hidrogênio, amônia verde); iii. Eletrificação;
Rotas de escopo 3	iv. DRI, HBI e aglomerados a frio; e v. Novas tecnologias (autorredução e energia de baixo carbono para navegação).

Fonte: Elaboração própria.

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 tem uma posição estratégica devido à riqueza de recursos minerais disponíveis, ao acesso a fontes de energia renovável e a tecnologia de ponta. Isso coloca a indústria de mineração brasileira em uma posição privilegiada para liderar os esforços de descarbonização dentro do setor, além de para apoiar a transição de seus clientes, inclusive com o fornecimento de minerais para transição energética.

Indústria química

Diferentemente dos setores de aço e cimento, a indústria química abrange uma grande variedade de processos para criar produtos que utilizamos todos os dias. Os produtos químicos integram as cadeias produtivas de diversos setores da economia, tais como: os setores farmacêutico e de fertilizantes, as indústrias alimentícia, automobilística, de construção, de tecnologia eletrônica e têxtil, além do setor de energia renovável.²¹ 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.

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

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 CO₂. Isso ocorre porque 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 insumo ou matéria-prima.

²¹ 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.

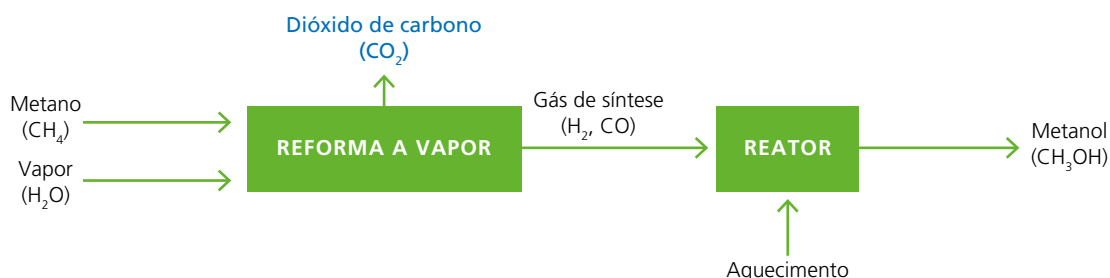
As emissões decorrem tanto da energia consumida nos processos de produção quanto diretamente das reações e transformações químicas dos insumos. De acordo com a IEA (2020a), a indústria química responde por 5% a 6% das emissões globais de GEEs, em comparação com 7% a 8% cada para as indústrias de aço e cimento.

No Brasil, segundo dados do Seeg, em 2020, a indústria química foi responsável por 3,7% das emissões dos processos industriais, das quais 53,2% são provenientes da produção de amônia. De acordo com a IEA,²² globalmente, a produção de amônia também é responsável pela maior parcela de emissões, representando 45% das emissões da produção química primária, seguida pela de metanol (28%) e pela de produtos químicos orgânicos de alto valor, tais como: eteno (ou etileno), propileno, benzeno, tolueno e xilenos mistos (27%).

Ainda que o carbono seja uma matéria-prima comum ou um subproduto da produção tanto de produtos químicos orgânicos quanto inorgânicos, nos ateremos a discutir os orgânicos – metanol²³ e eteno –, reservando a discussão sobre o processo de produção da amônia para a seção dedicada à indústria de fertilizantes.

METANOL

FIGURA 4. Processo simplificado de produção de metanol



Fonte: Adaptado de Gross (2021).

Atualmente, o metanol é produzido principalmente a partir do gás natural. Este é misturado com vapor de alta pressão e alimenta reatores de reforma a vapor para produzir gás de síntese, uma mistura composta principalmente de 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, requerendo grande quantidade de energia térmica para geração de vapor.

No entanto, o gás de síntese pode ser produzido a partir de qualquer material contendo carbono, incluindo carvão, óleo, resíduos agrícolas, florestais ou resíduos sólidos urbanos.

²² Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/industry/chemicals>. Acesso em: 4 fev. 2024.

²³ 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, 2019).

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 usados em sacolas e embalagens, PET usado em garrafas e 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. Esse processo não gera CO₂ 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 na indústria química

Como maior consumidor industrial de energia, as principais oportunidades de redução significativa de emissões na indústria química estão diretamente relacionadas à substituição de fontes fósseis de energia por outras derivadas de biomassa (madeira e biocombustíveis) ou por energia elétrica renovável (eletrificação e hidrogênio verde). Outras alternativas contemplam soluções inovadoras para ampliar a eficiência energética nas plantas industriais, além da reciclagem para produção de químicos e na indústria de plásticos, citada na seção *Contribuições das indústrias de base na transição para economia de baixo carbono* como contribuição do setor para uma economia de baixo carbono.

QUADRO 3. Rotas para descarbonização identificadas na indústria química

Rotas de curto e médio prazo	i. Esforço consolidado de abatimento de N ₂ O; 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.

Indústria de fertilizantes

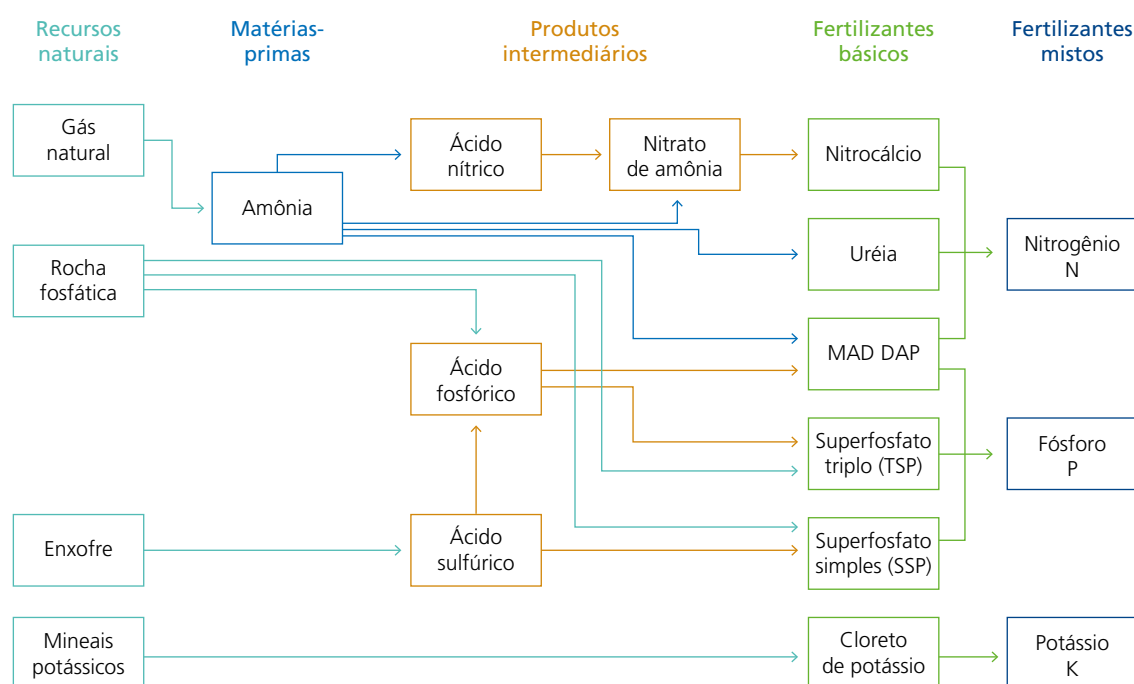
O uso de fertilizantes desempenha um importante papel na agricultura, fornecendo nutrientes essenciais para as plantas e, conseqüentemente, aumentando a produtividade agrícola por hectare cultivado.

A Figura 5 ilustra a cadeia produtiva de fertilizantes, começando com recursos naturais como gás natural, rocha fosfática, enxofre e minerais potássicos. A partir deles, são produ-

zidas matérias-primas essenciais, como a amônia, e importantes compostos químicos, como ácidos nítrico, fosfórico e sulfúrico. Esses componentes são fundamentais na fabricação de diversos tipos de fertilizantes.

Entre os fertilizantes básicos produzidos estão ureia, MAP (fosfato monoamônico), DAP (fosfato diamônico), TSP (superfosfato triplo), SSP (superfosfato simples) e KCL (cloreto de potássio). 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 5. Processo produtivo simplificado da indústria de fertilizantes

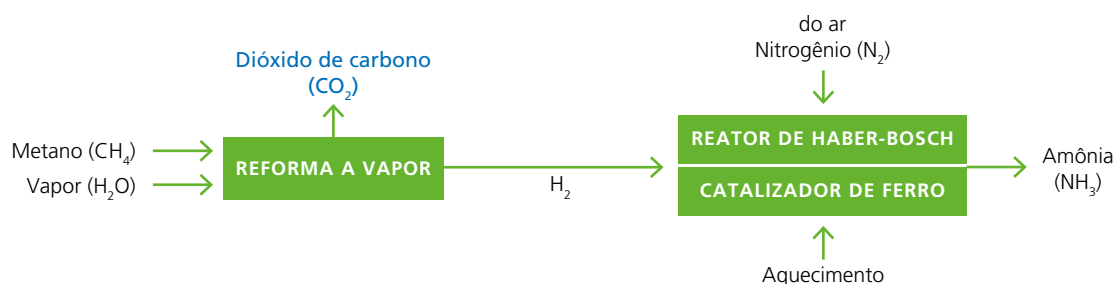


Fonte: Elaboração própria com base em Dias e Fernandes (2006).

Na indústria de fertilizantes, a cadeia da amônia (NH_3) é considerada a principal fonte de emissão de GEEs, inclusive pela geração de óxido nítrico no processo de fabricação de ácido nítrico. Ambos estão relacionados, principalmente, aos processos de produção de fertilizantes nitrogenados, cruciais para fornecer nitrogênio aos cultivos agrícolas.

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. O gás natural desempenha um papel crucial no processo, servindo tanto como matéria-prima quanto como fonte de calor. Em geral, desde as matérias-primas de hidrocarbonetos até a síntese de amônia (NH_3), são liberadas quantidades significativas de CO_2 . Dessa forma, a produção de uma tonelada de amônia gera aproximadamente 2,4 t CO_2 (World Economic Forum, 2023).

FIGURA 6. Processo simplificado de produção de amônia



Fonte: Adaptado de Gross (2021).

O óxido nitroso (N_2O), por sua vez, é um dos gases que mais contribuem para o efeito estufa, junto com o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e os gases fluorados.

Rota de descarbonização na indústria de fertilizantes

As rotas de descarbonização na indústria de fertilizantes têm muito em comum com as rotas da indústria química, uma vez que compartilham processos, técnicas e matérias-primas. O Quadro 4 apresenta os principais pilares que respondem pela redução das emissões do setor.

QUADRO 4. Rotas para descarbonização identificadas 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.

Indústria de base florestal

A indústria de base florestal é composta de duas atividades distintas – a atividade florestal e a atividade industrial – que apresentam padrões de emissão de GEEs distintos.

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, seguida 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 de carbono.

A atividade industrial, por sua vez, transforma a madeira proveniente de florestas plantadas por meio de processos de refino. Esses processos envolvem um elevado consumo de energia e transformações químicas que concentram as 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 estocado 1,82 bilhão de tCO₂e, o que representaria cerca de 80% das emissões nacionais em 2023 (IBÁ, 2023).

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 energético 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 GEEs 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 nessa 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.²⁴

PROCESSO DE PRODUÇÃO DA CELULOSE

O processo de produção de celulose *kraft*²⁵ é um método amplamente utilizado para obter celulose a partir da madeira. Trata-se de 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 (Na₂S), 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, onde passa por um processo de trituração em um picador, em que as toras de madeira são transformadas em cavacos, que consistem em pequenos fragmentos de madeira.

²⁴ O Greenhouse Gas Protocol (Protocolo de Gases de Efeito Estufa) é uma iniciativa desenvolvida pelo World Resources Institute (WRI) em parceria com o World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). Ela fornece diretrizes e padrões para contabilizar e relatar as emissões de GEEs de atividades humanas.

²⁵ Segundo a IBÁ (2023), em 2022, o percentual de celulose produzido no Brasil pelo processo *kraft* foi de, aproximadamente, 97,5%.

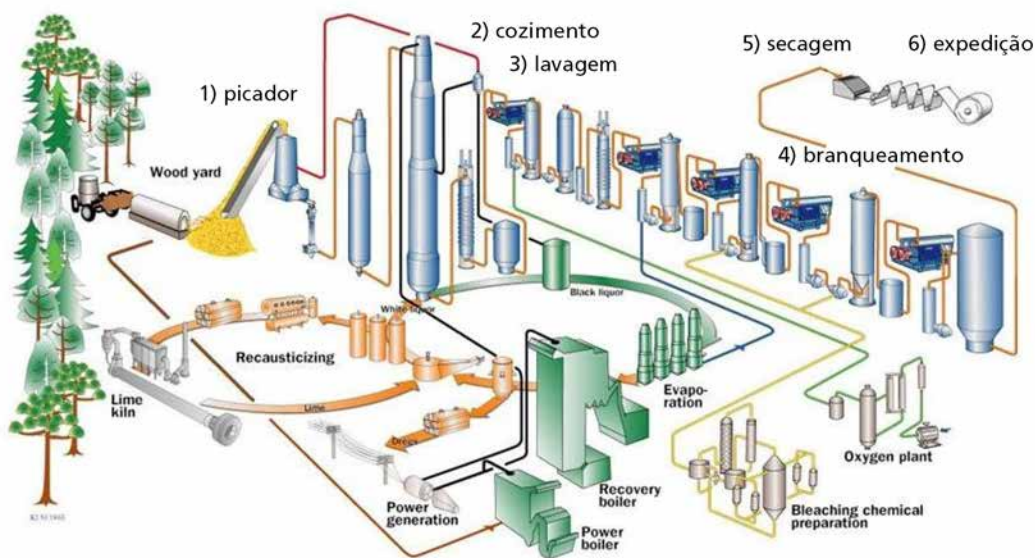
Os cavacos seguem para uma etapa de cozimento a alta pressão e temperatura em reatores chamados digestores, onde são misturados ao licor branco. O calor e os produtos químicos separam a lignina das fibras de celulose. A celulose é preservada, mas a lignina, substância que une as fibras de celulose tornando-a 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, então, 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 e está pronta para ser enviada para venda ou para a produção de diversos tipos de papéis e produtos.

Enquanto as fibras de celulose seguem o caminho²⁶ de lavagem, branqueamento, secagem e expedição, o licor preto segue para queima na caldeira de recuperação. Nessa etapa ocorre não apenas a recuperação de produtos químicos valiosos, como o hidróxido de sódio, como também a geração de calor/vapor, que é aproveitado na cogeração de energia utilizada em diferentes estágios do processo de produção.

No processo de recuperação, parte do licor residual é retirada e forma o que é chamado de licor verde. Ao 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.

FIGURA 7. Processo produtivo da celulose



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

26 O processo de lavagem, branqueamento, secagem e expedição da celulose segue a linha verde da Figura 7.

Na indústria de celulose, as atividades com maior potencial de emissões de GEEs ocorrem na caldeira de recuperação, no forno de cal e nos aquecedores. Segundo Yang, Meerman e Faaij (2021), a caldeira de recuperação tem o potencial de gerar a maior parte das emissões de CO₂ – cerca de 74% –, 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 CO₂ biogênico, logo carbono neutro. Segundo o International Council of Forest and Paper Associations (ICFPA) (2022), a IEA Bioenergy (Cowie, 2021) e o Intergovernmental Panel on Climate Change (2018), o CO₂ liberado não representa uma adição líquida na atmosfera, pois faz parte do ciclo biológico do carbono e apresenta um ciclo mais curto de vida quando comparado ao das emissões derivadas dos combustíveis fósseis.

Em um esforço contínuo da indústria em 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, que é 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 calandragem²⁷ 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 papelreira, a demanda por calor se deve principalmente à grande quantidade de água que precisa ser evaporada durante a secagem da polpa e do papel. A etapa de secagem representa 70% do consumo de energia do setor.

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

Rotas de descarbonização na indústria de base florestal

A indústria de base florestal brasileira apresenta significativo potencial para contribuir na transição para uma economia de baixo carbono, com: (i) remoções e estoque de CO₂ pelas árvores por meio da gestão sustentável das florestas; (ii) emissões evitadas no processo

²⁷ Calandragem 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 sua espessura e melhorar suas propriedades ópticas.

produtivo, tanto pela reutilização de resíduos e subprodutos (circularidade) quanto pela autossuficiência energética com o uso de fontes renováveis; e (iii) substituição²⁸ de produtos com alto teor de carbono, geralmente de origem fóssil, por produtos que contêm carbono biogênico, proveniente de fontes naturais renováveis (Figura 8).

FIGURA 8. Contribuição da indústria de base florestal para economia de baixo carbono



Fonte: Adaptado de IBÁ (2018).

Em relação à atividade industrial, o setor tem avançado nos eixos de descarbonização conforme o Quadro 5.

QUADRO 5. Rotas para descarbonização identificadas 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.

DESAFIOS PARA OS INVESTIMENTOS EM DESCARBONIZAÇÃO

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. Já a cobrança do prêmio verde está sujeita à preferência do mercado consumidor em adquirir produtos de menor pegada de carbono. Esse adicional é aplicado sobre o preço padrão do produto, já incluindo os custos de carbono internalizados.

28 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.

Se, atualmente, o estímulo por meio de incentivos positivos ainda é limitado, a pressão oriunda de mecanismos de proteção contra a fuga de carbono²⁹ em países importadores é iminente. Um exemplo é o Mecanismo de Ajuste de Fronteiras de Carbono (CBAM) da União Europeia, cuja implementação teve início em outubro de 2023. Ao fim da implementação do mecanismo – prevista para 2026 –, às importações será somado um valor de ajuste de emissão de carbono equivalente ao preço que teria sido pago caso 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 dura até 2025 e representa um período piloto para coletar informações e aprimorar a metodologia de reporte das emissões envolvidas nas importações. Durante esse período, os importadores de bens dos setores de siderurgia, cimento e fertilizantes³⁰ precisarão relatar as emissões de GEEs incorporadas em 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.

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 as 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.

Como já explicado, 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 ao garantir retorno financeiro satisfatório. Essa medida é essencial não apenas para incentivar a redução das emissões de gases de efeito estufa em nível nacional, mas também para adequar a produção nacional de forma a garantir direito aos certificados das emissões embutidas em seus produtos, como o CBAM,³¹ e garantir a competitividade das indústrias brasileiras em um mercado global cada vez mais regulado e consciente das questões ambientais.

29 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 onde as regulamentações são mais brandas, seja pelo aumento das importações.

30 Além de hidrogênio e eletricidade.

31 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.

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 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 um forte desincentivo para os investimentos em projetos de descarbonização.

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 internacionais.³²

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. Em um estudo publicado na revista *GCB Bioenergy* (2021), os cientistas da IEA propõem a abordagem sistêmica do ciclo de vida do carbono como o 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.

De maneira análoga, em seu último relatório, o IPCC (2023) ressalta o potencial da tecnologia de bioenergia combinada com a captura e/ou estoque de carbono (*bioenergy with carbon capture 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 CO₂ da atmosfera (*carbon dioxide removal* – CDR) (EPE, 2023b).

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

32 Artigo científico publicado por cientistas envolvidos na IEA Bioenergy na revista *GCB Bioenergy* intitulado “Applying a science-based systems perspective to dispel misconceptions about climate effects of forest bioenergy” examina debates relacionados aos impactos climáticos da bioenergia florestal em aplicações que incluem produção de calor, geração de eletricidade e transporte. Ver Cowie e outros (2021).

O PAPEL DO BNDES

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

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

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 Climática³³ incluem:

- a ampliação do financiamento e do engajamento de clientes;
- o alinhamento das atividades ao Acordo de Paris;
- a articulação com diversos atores e desenvolvimento de competências; e
- a viabilização de recursos financeiros por meio da atração de recursos concessionais e privados para o interesse público e a diversificação das fontes de recursos nacionais e internacionais.

Como parte de sua agenda em relação à 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 Nova Indústria Brasil (NIB), o Projeto de Lei do Mercado de Carbono (PL 2.148/2015), a discussão sobre a taxonomia brasileira, planos e fóruns específicos para transição energética, hidrogênio e indústria de baixo carbono, além de ter participado da COP 28, do G20 e da Cúpula da Amazônia.

³³ Saiba mais em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/23806/1/PRFol_216009_Diretrizes%20do%20BNDES%20para%20mudan%c3%a7a%20clim%c3%a1tica.pdf.

Contribuições do BNDES na agenda de descarbonização da política industrial

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

O BNDES participou ativamente de toda a discussão para a definição da política e, em conjunto com representantes da Secretaria Executiva do CNDI, da Casa Civil da Presidência da República, do Ministério de Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (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 (GT de Coordenação do Financiamento).

No âmbito desse grupo foram elaborados princípios, missões e objetivos específicos para o desenvolvimento industrial, inseridos na política Nova Indústria Brasil, 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. Está fundamentada em princípios norteadores e tem como objetivo catalisar investimentos e inovações em diversos setores, promovendo colaborações em sua execução.

A Resolução CNDI 01/2023, que propõe a nova política industrial, elencou seis missões. 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 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 Nova Indústria Brasil (Brasil, 2024), o qual contempla instrumentos regulatórios, compras públicas e financiamento. O

documento também sugeriu metas aspiracionais por missão. Para a missão V, foram definidas as seguintes metas aspiracionais:

- i. promover a indústria verde, reduzindo em 30% a emissão de CO₂ por valor adicionado da indústria, atualmente em 107 milhões de toneladas por trilhão de dólares;
- ii. ampliar em 50% a participação dos biocombustíveis na matriz energética de transportes, atualmente de 21,4%; e
- iii. aumentar o uso tecnológico e sustentável da biodiversidade pela indústria em 1% ao ano, conforme informações registradas no Sistema Nacional de Gestão do Patrimônio Genético e do Conhecimento Tradicional Associado (SisGen) do Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (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 Nova Indústria Brasil. O plano busca alcançar quatro grandes objetivos: uma indústria mais inovadora e digital, mais verde, mais exportadora e mais produtiva.

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 essa nova abordagem já começa a mostrar resultados. Em 2023, o Banco aumentou 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 94% em 2023 em relação ao mesmo período e 41% em comparação com o ano anterior. Além disso, houve um aumento significativo nas aprovações para inovação, 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 de descarbonização da indústria fez parte da frente de atuação de engajamento dos clientes e, juntamente com interações subsequentes com as empresas, tem proporcionado um *pipeline* em projetos de investimento com essa finalidade.

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

INSTRUMENTOS FINANCEIROS

Programa Fundo Clima

Destinado ao apoio de projetos relacionados à redução de emissões de gases do efeito estufa 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 e o objetivo de promover vantagens competitivas para o país, emprego verde de qualidade, resiliência climática e a redução da vulnerabilidade socioambiental e climática da população.

Para isso, em novembro de 2023, o governo 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 Sustentáveis³⁴ 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 responsabilidade do Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Atualmente, conta com uma carteira de mais de R\$ 2 bilhões em crédito já contratada pelo BNDES.

Conforme o Plano Anual de Aplicação de Recursos 2023-2024 (PAAR), definido pelo Comitê Gestor do Fundo Clima, o programa apresenta 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 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.

³⁴ Saiba mais em <https://www.gov.br/tesouronacional/pt-br/divida-publica-federal/titulos-sustentaveis>.

Programa Mais Inovação

Considerando que a descarbonização da indústria exigirá o desenvolvimento de novas tecnologias, destaca-se também o Programa BNDES Mais Inovação. Lançado pelo BNDES em setembro de 2023, o 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 14.592/2023.

Em termos absolutos, esse investimento está estimado em aproximadamente R\$ 5 bilhões por ano até 2026. O programa tem atualmente³⁵ três subprogramas, com condições de apoio distintas: (i) investimento em inovação; (ii) aquisição de bens inovadores; e (iii) difusão tecnológica.

Parceria Embrapii e BNDES Inova+

Ainda no âmbito do apoio à inovação, o BNDES mantém uma parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (Embrapii) para concessão de recursos não reembolsáveis com o objetivo de promover o desenvolvimento de novas tecnologias e inovações em sete focos temáticos:

- transformação digital;
- economia circular;
- materiais avançados;
- novos biocombustíveis;
- bioeconomia florestal;
- tecnologias estratégicas do Sistema Único de Saúde (SUS); e
- defesa.

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

Atuação via mercado de capitais

Apoio a empresas brasileiras em todos os estágios de crescimento por meio de instrumentos de renda variável, como foco em planos de negócios alinhados com o planejamento estratégico do BNDES. O apoio se dá por meio da BNDESPAR, subsidiária do Banco.

³⁵ Para informações atualizadas em relação às linhas e condições de financiamento, consultar www.bndes.gov.br.

A atuação em renda variável pode se dar por meio de fundos de investimento, como Fundo Criadec 4 e GEF Latam Climate Solutions, 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 Nova Indústria Brasil. Em conjunto com fundos e investidores privados selecionados pelo BNDES, busca-se 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

Entre os instrumentos de apoio à indústria mais verde anunciados e o primeiro 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 (PGM), molibdênio, nióbio, níquel, silício, tântalo, terras raras, titânio, tungstênio, urânio, vanádio, zinco, fosfato, potássio e outros minerais para promoção de fertilidade de solo. São elegíveis companhias com sede e operações no Brasil ou entidades com sede no exterior que detenham, no momento do primeiro investimento do fundo, 90% ou mais de ativos no Brasil e apresentem receita operacional bruta anual de até R\$ 300 milhões.

CONCLUSÃO

O Brasil dispõe de elementos-chave para obter êxito na descarbonização industrial e na transição para uma 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 o consumo interno e a 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 visam não apenas aproveitar a eficiência do país na produção de baixo carbono, mas também criar valor para clientes. Essa abordagem estratégica deve combinar investimentos, políticas públicas e iniciativas empresariais.

Conforme discutido ao longo do ciclo de seminários promovido pelo BNDES, as indústrias de base no Brasil desfrutam de uma posição privilegiada decorrente das vantagens indicadas e, em geral, apresentam taxas de emissões menores do que as dos demais países produtores para as mesmas tecnologias. Esse diferencial decorre não só dessas vantagens como também 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 redução e neutralidade de carbono vigentes 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 6. Sumário de rotas de descarbonização das indústrias de base

SETORES/EIXOS	BIOMASSA	OUTROS SUBSTITUTOS (MATÉRIA-PRIMA OU ENERGIA)	CAPTURE 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)	Tecnologia 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 autoredução com biomassa em substituição ao carvão mineral	• Disponibilidade de sucata • Gás natural (transição) e hidrogênio verde para redução direta • Nova tecnologia de etrólise 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)	

(continua)

(continuação)

SETORES/EIXOS	BIOMASSA	OUTROS SUBSTITUTOS (MATÉRIA-PRIMA OU ENERGIA)	CAPTURA DE CARBONO/ESCOPO 3
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 pelletização tradicional intensiva em energia • Atendimento à demanda crescente de minerais críticos para transição energética

Fonte: Elaboração própria.

Cabe destacar a vantagem brasileira relativa à utilização sustentável da biomassa, que substitui insumos fósseis em diversos setores. No caso da indústria química, essa 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 país, que, por sua vez, refletirão as diversas condições que têm se demonstrado necessárias à luz dos movimentos recentes em âmbito internacional. Diversos países têm implementado políticas robustas contemplando instrumentos de financiamento e compartilhamento de risco, internalização do custo de carbono via mercado e mecanismos de ajuste de fronteira, além de outros esforços para impulsionar o desenvolvimento de novas tecnologias e cooperação internacional.

São políticas fundamentais para superação dos desafios:

- viabilizar investimentos transformadores em indústrias com alta ociosidade;
- viabilizar a intensidade de capital em novas plantas que incorporam tecnologias pouco consolidadas;
- proporcionar competitividade às rotas de baixo carbono *vis-à-vis* rotas consolidadas a base de recursos fósseis;
- amadurecer regulações sobre rotas prioritárias (ex.: hidrogênio e biometano, respectivamente, PL 2308/2023 e PL 528/2020);
- disponibilidade, sustentabilidade e custo de materiais essenciais; e
- aprendizado tecnológico e desenvolvimento de novas rotas.

O estabelecimento de políticas públicas adequadas, o fomento a pesquisa, desenvolvimento e inovação (P,D&I) e à 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 dessa forma, o Brasil poderá consolidar uma posição de liderança na agenda de descarbonização da economia e, assim, contribuir de forma efetiva para a construção de um futuro mais sustentável e resiliente.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL. *2019 guide to the business of chemistry*. Washington, DC: ACC, 2019. Disponível em: <https://www.americanchemistry.com/GBC2019.pdf>. Acesso em: 5 fev. 2024.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. *Resultados do inventário nacional de emissões de gases de efeito estufa por unidade federativa*. Brasília, DF: MCTI, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/LO_GIZ_RESULTADOINVENTARIO_00_PAGINASINDIVIDUAIScompactado.pdf. Acesso em: 19 fev. 2024.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. *Plano de ação para a neoindustrialização 2024-2026*. Brasília, DF: MDIC, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/composicao/se/cndi/plano-de-acao/nova-industria-brasil-plano-de-acao.pdf>. Acesso em: 7 fev. 2024.

CARVALHO, Pedro Sérgio Landim de et al. Sustentabilidade socioambiental da mineração. *BNDES Setorial*, n. 47, p. 333-390, 2018. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/15221>. Acesso em: 22 fev. 2024.

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. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/7204/1/Minera%20a7%20a3o_P.pdf. Acesso em: 8 jan. 2024.

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>.

DIAS, Victor Pina; FERNANDES, Eduardo. *Fertilizantes: uma visão global sintética*. BNDES Setorial, 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%20Global%20Sint%20a9tica_P.pdf. Acesso em 20 fev. 2024.

DIETZ, Simon et al. *Carbon performance assessment in the diversified mining sector: discussion paper*, May 2020. Disponível em: [2020-carbon-performance-assessment-in-the-diversified-mining-sector-discussion-paper](https://transitionpathwayinitiative.org/2020-carbon-performance-assessment-in-the-diversified-mining-sector-discussion-paper) (transitionpathwayinitiative.org). Acesso em: 15 fev. 2024.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanço Energético Nacional*. Ano base 2022. Rio de Janeiro: EPE, 2023a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>. Acesso em: 26 fev. 2024.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Captura e armazenamento de carbono biogênico: Bio-CCS*. Rio de Janeiro: EPE, 2023b. 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 fev. 2024.

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 fev. 2024.

HORA, André Barros da; MELO, Luciane. Papel e celulose. In: BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. *Panoramas setoriais: mudanças climáticas*. Rio de Janeiro: BNDES, 2016. p. 47-54.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. *A indústria de árvores plantadas e as mudanças climáticas*. 2018. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/pdf/info-mudancas-climatica-2018.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2024.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. *Relatório anual 2023*. São Paulo: IBÁ, 2023. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>. Acesso em: 7 fev. 2024.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. *II Inventário de Gases Estufa do Setor Mineral*. Brasília, 2014. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/00005153.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2024.

ICFPA – INTERNATIONAL COUNCIL OF FOREST AND PAPER ASSOCIATIONS. Policy Statement. *Carbon neutrality of biomass*, 2022. Disponível em: <https://icfpa.org/wp-content/uploads/2022/01/ICFPA-Policy-Statement-Carbon-Neutrality-of-Biomass-January-2022.pdf>. Acesso em: 7 fev. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Chemicals. *IEA*, Paris, 11 jul. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/industry/chemicals>. Acesso em: 22 fev. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *The challenge of reaching zero emissions in heavy industry*. Paris: IEA, 2020a. Disponível em: <https://www.iea.org/articles/the-challenge-of-reaching-zero-emissions-in-heavy-industry>. Acesso em: 22 fev. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Iron and steel technology roadmap: towards more sustainable steelmaking*. Paris: IEA, 2020b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>. Acesso em: 10 set. 2023.

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.

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*. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Geneva: IPCC, 2018.

RISSMAN 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>.

UNECE – UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE. *Technology brief: carbon neutral energy intensive industries*. Geneva: Unece, 2022. Disponível em: unece.org/sites/default/files/2022-11/Industry_brief_EN_2.pdf. Acesso em: 17 fev. 2024.

UNITED STATES. *Industrial decarbonization roadmap*. Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2022. Disponível em: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-09/Industrial%20Decarbonization%20Roadmap.pdf>. Acesso em: 8 fev. 2024.

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. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/1484/1/A%20BS%2034%20A%20atua%20a7%20a3o%20do%20BNDES%20nos%20setores%20de%20florestas%20plantadas%20e%20pain%20e%20de%20madeira%20e%20celulose%20e%20pap%20e%20o%20per%20adodo%202001-2010_P.pdf. Acesso em: 7 fev. 2024.

ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Gonzalo Visado e Marcelo Pecchio (orgs.). Rio de Janeiro: SNIC, 2019.

ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Principais diretrizes. Gonzalo Visado e Marcelo Pecchio (orgs.). Rio de Janeiro: SNIC, 2019b.

WORLD ECONOMIC FORUM. *Net-zero industry tracker 2023*. Geneva: World Economic Forum, 2023. Disponível em: <https://www.weforum.org/publications/net-zero-industry-tracker-2023/in-full/ammonia-industry-net-zero-tracker>. Acesso em: 8 fev. 2024.

WORLD STEEL ASSOCIATION. *Energy use in the steel industry*. Bruxelas: Worldsteel, 2021. Disponível em: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-Energy-use-in-the-steel-industry.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2024.

YANG, F.; MEERMAN, J.C.; FAAL, A.P.C. Carbon capture and biomass in industry: A techno-economic analysis and comparison of negative emission options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 144, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403212100318X>. Acesso em: 20 fev. 2024.

AUTORES

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

COORDENAÇÃO

Flávio Moraes da Mota
Claudia Pimentel Trindade Prates

CONTRIBUIÇÃO

André Albuquerque Sant'Anna
Rodrigo José 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

Agosto de 2024



MINISTÉRIO DO
DESENVOLVIMENTO,
INDÚSTRIA, COMÉRCIO
E SERVIÇOS

