

Coalizão Minerais Essenciais

Contribuição do Setor de Mineração para a descarbonização e a transição energética

Estudo completo

Sobre este relatório

Este relatório é resultado do esforço conjunto de um amplo grupo de organizações ligadas ao setor mineral brasileiro, reunidas sob a coordenação do CEBDS, da Vale e do IBRAM. O estudo tem como objetivo construir uma visão consolidada sobre as contribuições da mineração brasileira para a descarbonização e a transição energética global.

Essa perspectiva inclui a análise do potencial de descarbonização da mineração no Brasil até 2050, das possíveis contribuições para a cadeia do minério de ferro, e do potencial de produção de minerais para aplicações de transição energética. O estudo também descreve habilitadores sistêmicos que dependerão da atuação coordenada de múltiplos atores e serão indispensáveis para a materialização das contribuições analisadas.

Os cenários e estimativas apresentados baseiam-se em premissas e fontes reconhecidas, que incluem publicações do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) e da Agência Internacional de Energia (*IEA*), os Cadernos de Estudos do Plano Nacional de Mineração 2050 e os relatórios das Coalizões setoriais de Transportes e Energia, também coordenadas pelo CEBDS, entre outras fontes.

Índice

1 Introdução e resumo das conclusões 5

1.1 A transição energética global e a posição do Brasil 5

1.2 A Coalizão Minerais Essenciais: origem e propósito 5

1.3 Resumo das conclusões: oportunidades de contribuição da mineração e habilitadores necessários 7

2 Emissões do setor de mineração e oportunidades de descarbonização 8

2.1 Definição de um cenário de emissões futuro de inação, ou *business-as-usual* 10

2.2 Mapeamento das alavancas para redução e estimativa do impacto das contribuições 12

2.2.1 Substituição de combustíveis 15

2.2.2 Eletrificação e *power-to-X* 16

2.2.3 Energia renovável 17

2.2.4 Eficiência e inovação em processos 17

2.2.5 Uso da terra e florestas 17

3 Cadeia do Minério de Ferro: contribuições da mineração para a descarbonização 20

3.1 Expansão de insumos para produção de aço de baixo carbono 21

3.2 Colaboração com fornecedores na navegação de longo curso 24

3.3 Descarbonização da etapa de pelotização 26

3.4 Redução de emissões logísticas ligadas ao transporte ferroviário 28

4 Minerais para a transição energética: expansão da produção e contribuição para a descarbonização global 29

4.1 Expansão da produção de minerais para transição energética 30

4.1.1 Seleção de minérios para quantificação 30

4.1.2 Projeções de crescimento da produção brasileira 34

4.2 Impacto em emissões 35

4.2.1 Impacto em emissões globais em 2050 35

4.2.2 Impacto nas emissões brasileiras em 2035 e 2050 36

5 Habilitadores para a descarbonização do setor mineral e expansão de minerais para a transição energética 38

5.1 Tecnologia e P&D 39

5.1.1 Hidrogênio e redução de custos 40

5.2 Infraestrutura 41

5.2.1 Produção, distribuição e armazenagem de biocombustíveis 41

5.2.2 Expansão da rede de transmissão e distribuição de energia elétrica para suporte a eletrificação 41

5.2.3 Infraestrutura para escoamento da produção mineral 41

5.3 Financiamento 43

5.4 Premio verde e Cadeia de Valor 44

5.4.1 Mecanismos de contabilidade e rastreabilidade 44

5.4.2 Circularidade 44

5.5 Cenário regulatório-econômico 46

5.5.1 Previsibilidade e agilidade de licenciamento 46

5.5.2 A precificação do carbono e o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões 47

5.5.3 Contabilização de soluções de recuperação de áreas e sequestro de carbono 48

5.6 Habilitadores de âmbito internacional e a COP30 48

6 Apêndice 50

6.1 Fontes 51

6.2 Lista longa de alavancas avaliadas 52

6.3 Premissas para modelagem 53

6.4 Detalhamento das projeções de produção de minerais para a transição energética 56

6.4.1 Bauxita 56

6.4.2 Manganês 56

6.4.3 Cobre 57

6.4.4 Zinco 57

6.4.5 Silício 58

6.4.6 Nióbio 58

6.4.7 Níquel 59

6.4.8 Grafite 59

6.4.9 Vanádio 60

6.4.10 Lítio metálico 60

6.4.11 Lítio 61

6.4.12 Tântalo 61

6.4.13 Terras raras 62

6.4.14 Cobalto 62



01

Introdução e resumo das conclusões

1.1 A transição energética global e a posição do Brasil

A transição energética global dependerá de forma decisiva da mineração, tanto pelo crescimento acelerado da demanda associada às soluções da transição energética, quanto pelo fortalecimento da demanda por minerais já consolidados. Esse processo cria oportunidades estratégicas, mas também riscos de dependência e pressões sobre as regiões e países responsáveis pela oferta atual e futura.

Do ponto de vista global, três tendências principais se destacam:

- **Aumento do volume e desenvolvimento de novas áreas de exploração e cadeias de suprimento de minerais para a transição energética** (lítio, níquel, grafite, etc.), fundamentais para baterias, mobilidade elétrica e geração renovável;
- **Maior relevância da demanda associada à transição energética por minerais já consolidados** (como ferro e bauxita), impulsionada tanto pelas aplicações diretas na transição energética quanto pela expansão de infraestrutura associada (ex. redes elétricas);
- **Aumento de riscos associados à concentração produtiva e tensões geopolíticas,** que elevam a vulnerabilidade do fornecimento global;
- **Evolução e reconfiguração das cadeias de beneficiamento e processamento dos minerais, globalmente,** motivadas por fatores econômicos, requisitos de sustentabilidade, e previsibilidade de oferta de insumos.

Nesse cenário, a mineração brasileira está estrategicamente bem posicionada para apoiar a transição energética, em função de suas vantagens competitivas:

- **Diversidade geológica entre as maiores do mundo,** abrangendo múltiplos minerais que terão a demanda multiplicada nas próximas décadas;
- **Setor mineral desenvolvido, matriz elétrica renovável e custos de energia e mão de obra competitivos,** que favorecem projetos com menor intensidade de carbono e maior competitividade internacional;
- **Reconhecimento como fornecedor sustentável e com boa governança,** detentor de estruturas institucionais sólidas e regulação em constante aperfeiçoamento;
- **Potencial alinhamento entre metas climáticas e geração de valor local,** permitindo associar a produção mineral a políticas de desenvolvimento sustentável e industrialização verde.

Para que essas oportunidades se concretizem, **será essencial avançar em habilitadores sistêmicos** como tecnologia e pesquisa, infraestrutura, financiamento, regulação e mecanismos de alinhamento da cadeia de valor, criando as condições necessárias para que o setor mineral e as cadeias de valor a jusante contribuam de forma efetiva e sustentável para a transição energética.

1.2 A Coalizão Minerais Essenciais: origem e propósito

A Coalizão Minerais Essenciais foi articulada a partir do "Mutirão Global" convocado pela Presidência da COP30. Reunindo empresas, associações, especialistas e representantes do governo, a Coalizão consolidou uma visão de futuro compartilhada, capaz de alinhar as contribuições do setor mineral brasileiro aos compromissos nacionais e internacionais de descarbonização e transição energética. Essa construção coletiva alvancou relatórios setoriais e contou com *workshops* e entrevistas para incorporar o conhecimnto e visões da Coalizão, culminando neste relatório que sintetiza o potencial de impacto positivo do setor e habilitadores sistêmicos para que este potencial possa ser alcançado.

Grupo coordenador

cebds · VALE · IBRAM MINERAÇÃO DO BRASIL

Organizações participantes

ABAL Associação Brasileira do Alumínio · Alcoa · ambipar

AngloAmerican · cba · CBL Companhia Brasileira de Lítio

CSN Companhia Siderúrgica Nacional · MICHELIN · report

SAMARCO · SIEMENS · SIGMA LITHIUM

TABOCA

O esforço da Coalizão se apoiou em uma base robusta de conhecimento já produzido no Brasil e internacionalmente. Dentre as múltiplas fontes usadas, destacam-se as publicações do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), da Agência Internacional de Energia (*IEA*) e os Cadernos de Estudos do Plano Nacional de Mineração 2050. A lista completa de fontes pode ser encontrada no Apêndice.

A mineração permeia diferentes dimensões econômicas, sociais e ambientais, influenciando o ordenamento territorial, a produção de alimentos, bens industriais, energia e a preservação da biodiversidade. O trabalho da Coalizão priorizou a relação da mineração brasileira com a descarbonização e transição energética global, estruturando contribuições potenciais do setor em três enfoques de análise: **(1) redução das emissões diretas da mineração brasileira; (2) contribuições da mineração brasileira para a cadeia global do minério de ferro e aço; e (3) expansão da produção de minerais para setores ligados à transição energética**. Esses três escopos de análise têm universos de emissões bastante distintos, descritos a seguir.

As emissões diretas da mineração atingiram 12,8 $MtCO_2e$ em 2022 segundo o Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do IBRAM, que considera emissões em território nacional associadas ao decapeamento e abertura de frente de lavra, extração, beneficiamento físico, movimentação de máquinas e transporte interno, recuperação e encerramento de áreas. O inventário não inclui, portanto, emissões associadas ao transporte ferroviário ou navegação de longo curso, nem ligadas a processos de beneficiamento que vão além do tratamento físico dos minérios - por exemplo, a pelotização do minério de ferro. Este montante é relativamente pequeno quando colocado em perspectiva com as emissões brasileiras ou com as emissões das cadeias de valor alimentadas pela mineração.

Observando a **cadeia do minério de ferro brasileiro**, a Coalizão estimou emissões atuais entre **85 e 90 $MtCO_2e$** abrangendo as etapas de pelotização (2,5-3,5 $MtCO_2e$), transporte ferroviário (~2 $MtCO_2e$), transporte marítimo (15–20 $MtCO_2e$) e a siderurgia nacional (65 $MtCO_2e$[1]). Em escala global, a siderurgia, alimentada pelas exportações de minério de ferro brasileiro, foi responsável por 3,6 $GtCO_2e$.

Por fim, os minerais extraídos no país são **insumos essenciais para tecnologias de transição energética**, que contribuirão para a redução de emissões globais em sua etapa de uso ao substituir tecnologias com emissões fósseis. Neste estudo, são consideradas como soluções capazes de reduzir emissões os veículos elétricos (EVs), paineis solares e turbinas eólicas. Essas soluções impactam uma grande parcela das emissões globais atuais, totalizando, segundo dados do *Climate Trace*, **~23 $GtCO_2e$** (~15,8 $GtCO_2e$ do setor de energia, excluindo potencial de mitigação de CCUS para combustíveis fósseis; ~3,9 $GtCO_2e$ de emissões residenciais, excluindo emissões residuais; e ~3,6 $GtCO_2e$ do transporte rodoviário, excluindo emissões residuais e potencial de mitigação de biocombustíveis).

Figura 1 - Escopos de contribuição da mineração brasileira para a descarbonização e a transição energética global



1. Segundo a World Steel Association

1.3 Resumo das conclusões: oportunidades de contribuição da mineração e habilitadores necessários

A mineração brasileira tem **oportunidades relevantes para contribuir com a descarbonização e a transição energética** – neste estudo, três ângulos principais foram considerados.

A **redução das emissões diretas da mineração**, 12,8 $MtCO_2e$ em 2022, dependerá de alavancas como uso de biocombustíveis, eletrificação de frotas, expansão do uso de energia renovável, ganhos de eficiência, e recuperação de áreas para neutralizar emissões residuais:

- Até **2035**, considerando tecnologias com viabilidade técnico-econômica esperada neste horizonte de tempo (considerando preço de carbono discutido no capítulo *Habilitadores*), é possível **reduzir emissões em 25-35% e neutralizar ~14% de emissões associadas ao uso da terra,** resultando em **emissões residuais de 50~60%** em comparação ao cenário de inação de 15-17$MtCO_2e$;
- Até **2050**, considerando a aceleração da transição energética global e o desenvolvimento de habilitadores sistêmicos, o setor identifica potencial adicional de redução emissões, chegando a **emissões residuais líquidas de ~10%** em comparação ao cenário de inação de 18-24$MtCO_2e$.

As emissões residuais líquidas acima mencionadas dependem da contabilização das remoções de carbono para neutralizar emissões de uso da terra nos inventários corporativos. Essa contabilização não é permitida na atual metodologia *GHG Protocol,* mas é uma oportunidade para viabilizar as metas de neutralidade de carbono das mineradoras, como discutido no capítulo *Habilitadores*.

A mineração também pode **contribuir para a redução de emissões ao longo da cadeia global do minério de ferro** com a produção de insumos (pelotas e briquetes) para aço de baixo carbono, redução das emissões em pelotização, ferrovias e navegação de longo curso:

- Contribuições podem viabilizar **reduções de 100–110 $MtCO_2e$ em 2050** na cadeia global do minério de ferro.

Por fim, a **expansão da produção de minerais para viabilizar soluções para a transição energética global** – como a eletrificação de veículos, expansão da geração solar e eólica, redes elétricas e sistemas de armazenamento – podem ajudar a evitar:

- Em **2050, 1,6–2,0 $GtCO_2e$** das emissões globais;
- Dos quais **260–300 $MtCO_2e$ podem ser evitados no Brasil**;

As contribuições **dependerão da evolução de um conjunto de habilitadores sistêmicos que não dependem apenas do setor mineral** e deverão ser desenvolvidos e aperfeiçoados em colaboração com toda a cadeia de valor, financiadores, setor público, dentre outros:

- Cenário regulatório-econômico: alinhamento de **incentivos econômicos e precificação de carbono** que direcionem investimentos em tecnologias de baixo carbono, além de **aperfeiçoamento regulatório para permitir a expansão sustentável da produção** – incluindo licenciamento ágil e previsível – e das cadeias de insumos e infraestrutura necessária, assegurando competitividade dos produtos nacionais;
- Tecnologia e P&D: avanço de **tecnologias críticas com maturidade técnica e viabilidade econômica** considerando precificação de carbono, além de desenvolvimento de competências para beneficiamento local dos minerais e maior captura de valor;
- Infraestrutura: **rede de logística, energia e armazenagem com capilaridade** e capacidade suficientes para atender tanto operações em curso quanto novos projetos;
- Financiamento: **instrumentos financeiros verdes e taxonomia sustentável** capazes de reduzir riscos e ampliar o acesso a capital em escala para iniciativas de baixo carbono;
- Prêmio verde e cadeia de valor: ecossistema integrado com **previsibilidade de demanda** por produtos minerais de baixo carbono e **mecanismos de rastreabilidade** que alinhem incentivos ao longo da cadeia de valor.

Nota: A redução e neutralização de 90% das emissões da mineração em 2050, 17-21 $MtCO_2$, seria equivalente às emissões anuais de 8 a 10 milhões de veículos movidos a gasolina. A redução de 100-110 $MtCO_2$ na cadeia do minério de ferro seria equivalente a outros 50~55 milhões de veículos, grandeza próxima à frota brasileira de EVs projetada para 2050. Já a redução global de 1,6-2,0$GtCO_2$ a partir de soluções da transição energética é comparável às emissões totais brasileiras, que foram de ~2,3$GtCO_2e$ em 2023.



02

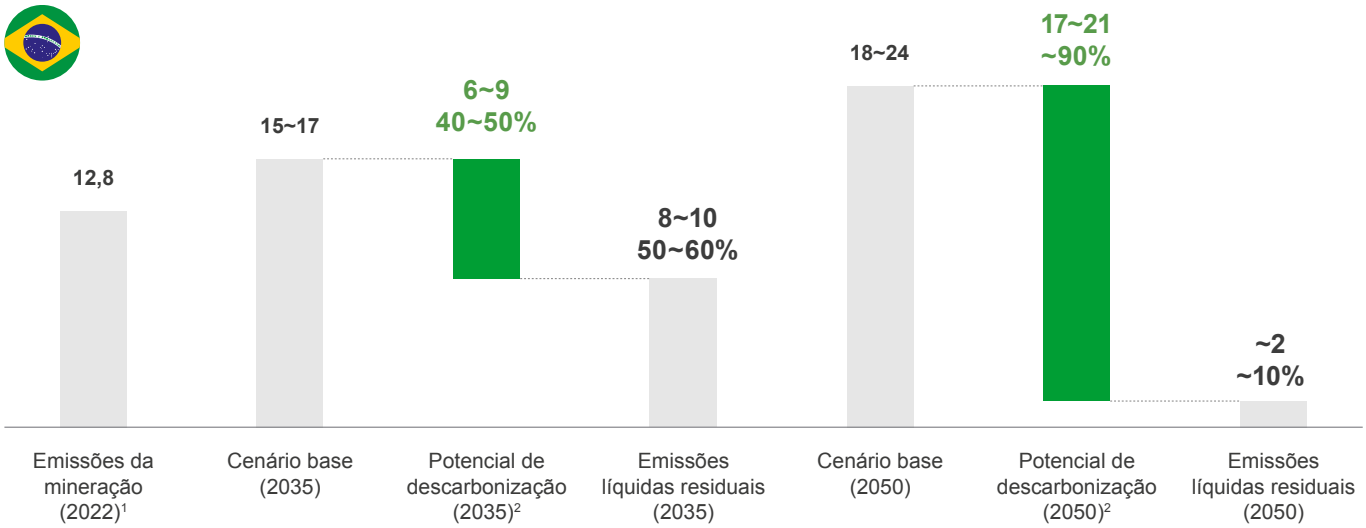
Emissões do setor de mineração e oportunidades de descarbonização

Considerando as emissões atuais de aproximadamente **12,8 $MtCO_2e$** (2022), o aumento de volume projetado para a produção nacional, se não for combinado a ações para redução da intensidade de emissões, levaria o setor a atingir entre **15 e 17 $MtCO_2e$ em 2035 e até 24 $MtCO_2e$ em 2050**.

A partir da melhoria das condições sistêmicas e aumento do ritmo da transição energética, as alavancas de descarbonização avaliadas têm capacidade de reduzir emissões de forma significativa. As análises da Coalizão indicam que emissões poderiam ser reduzidas e neutralizadas em até **40-50% em 2035**. Em uma visão de mais longo prazo, com maior incerteza associada aos habilitadores sistêmicos (discutidos em detalhes no capítulo *Habilitadores*) o setor entende ser potencialmente possível reduzir e neutralizar **até 90% das emissões em 2050**.

Mesmo após a implementação de todas as alavancas, haverá **emissões residuais da ordem de 10% em 2050**, que poderão ser neutralizadas por soluções baseadas na natureza e por mecanismos adicionais de compensação. O uso de soluções de neutralização e compensação para atingir as metas de redução das mineradoras é um tema ainda não endereçado pelas metodologias internacionais de inventários corporativos - este tema é explorado no capítulo *Habilitadores*.

Figura 2 - Mineração e consumo de energia (Emissões líquidas[1], $MtCO_2e$)



1. Considera as emissões das atividades de mineração do Inventário de Emissões do IBRAM referentes às etapas de decapeamento e abertura de frente de lavra, extração, beneficiamento, movimentação de máquinas e transporte interno, recuperação de áreas abertas, encerramento dessas áreas e aquisição de energia elétrica. Considera emissões líquidas de uso da terra, assumindo a remoção de carbono pelas áreas recuperadas equivalente às emissões anuais **2.** Premissas consideram a disponibilidade de combustíveis alternativos ao diesel, de tecnologias para descarbonização da frota e vigência de um preço de carbono que torne viável o custo de abatimento das emissões do setor, entre $65-100/ton em 2035 e $160-200/ton em 2050.
Fontes: IBRAM; Agência Nacional de Mineração; *Wood Mackenzie*; Estudos para o Plano Nacional de Mineração (PNM) 2050; *International Energy Agency (IEA)*; Debates da Coalizão

Nesse contexto, cinco grupos de alavancas se destacam como determinantes:

(i) **substituição de combustíveis fósseis** em frotas e equipamentos;

(ii) **eletrificação e *power-to-X*[1]** como vetores energéticos;

(iii) **ganhos de eficiência e inovação tecnológica** em minas e plantas industriais;

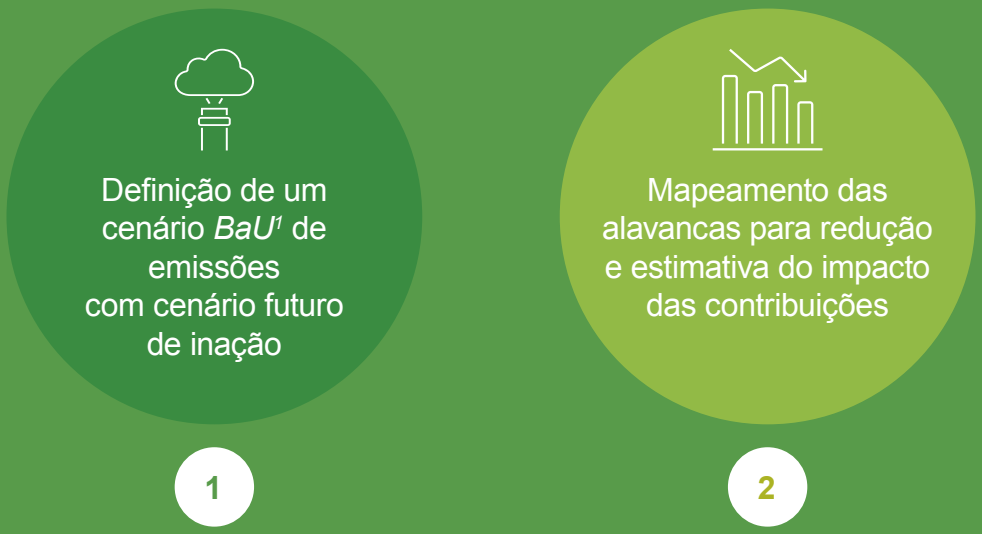
(iv) **expansão da energia renovável** via geração local e contratos de longo prazo;

(v) **uso sustentável da terra e reflorestamento** para neutralização de emissões residuais.

A implementação coordenada dessas soluções pode reduzir de maneira substantiva as emissões do setor, ao mesmo tempo em que cria oportunidades de investimento e fortalece a posição do Brasil como referência em mineração de baixo carbono.

1. *Power-to-X* (PtX) é o termo usado para descrever tecnologias que convertem eletricidade, geralmente de fontes renováveis (como solar e eólica), em diferentes vetores energéticos e combustíveis, como o hidrogênio.

Definição dos caminhos para a descarbonização envolverá dois passos



1. *Business-as-usual*, sem ações de descarbonização

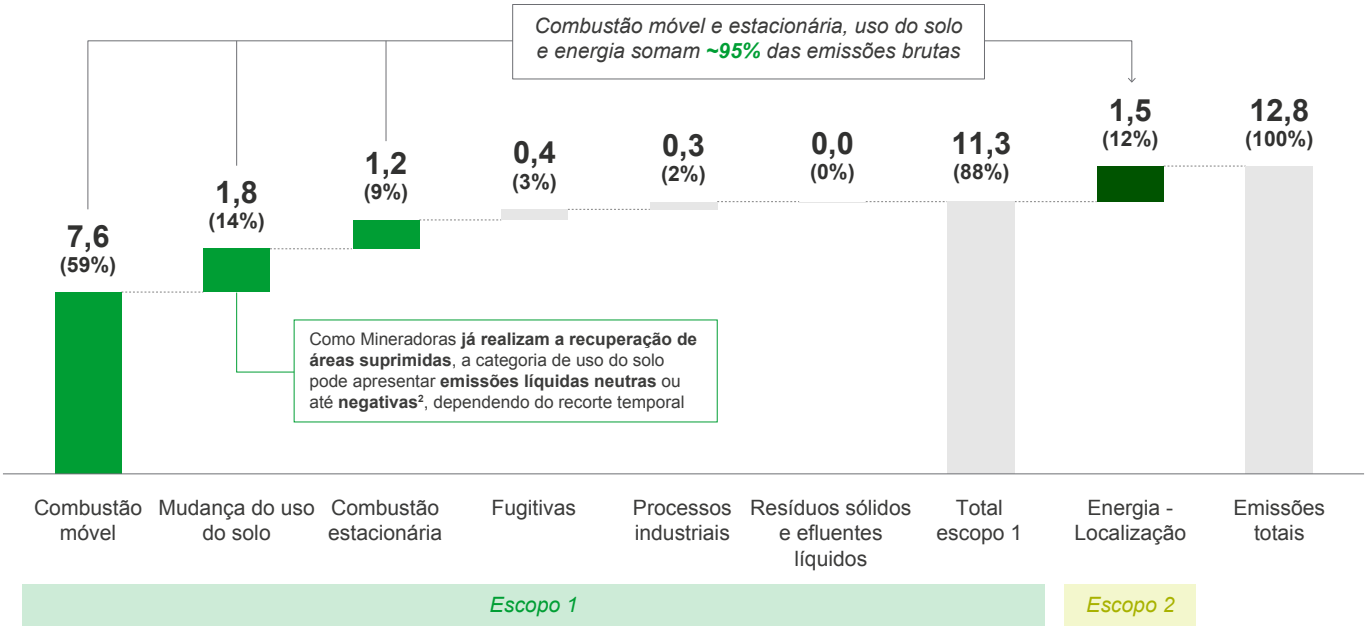
2.1 Definição de um cenário de emissões futuro de inação, ou *business-as-usual*

As emissões brutas do setor mineral brasileiro totalizaram aproximadamente **12,8 $MtCO_2e$** (escopos 1 e 2) em 2022, segundo o inventário de emissões do setor desenvolvido pelo IBRAM, considerando 27 tipologias minerais. **Combustão móvel** responde por quase 60% das emissões, associada principalmente ao uso de diesel em caminhões fora de estrada e equipamentos pesados. Outros 14% estão ligados à **mudança do uso do solo**, decorrente da abertura de novas frentes de lavra e da supressão vegetal. Já a **combustão estacionária**, vinculada a caldeiras, fornos e geradores, representa 9% do total. Somadas a essas fontes, o **consumo de energia elétrica** (escopo 2) responde por mais 12%.

Esses quatro grupos (combustão móvel, uso do solo, combustão estacionária e energia adquirida) concentram cerca de **95% de todas as emissões do setor**, configurando os pontos prioritários para ação climática. Outras fontes, como emissões fugitivas, processos industriais e resíduos, têm participação menos representativa no inventário total do setor.

É importante destacar que, no caso do **uso do solo**, a recuperação de áreas – prática já adotada pelas mineradoras tanto em função de obrigações regulatórias quanto como iniciativa voluntária – pode levar a emissões líquidas próximas de zero ou até negativas, dependendo do horizonte temporal considerado.

Figura 3 - Emissões brutas do setor de mineração[1] ($MtCO_2e$ - % dos escopos 1 e 2, 2022)



1. Os valores apresentados são uma estimativa para o setor mineral com base em dados reportados por empresas participantes e premissas. Devido às diferenças nas características operacionais, tecnológicas e geográficas das empresas, tais valores não representam necessariamente as emissões individuais de cada organização **2.** A contabilização de emissões líquidas de uso da terra depende da evolução metodológica internacional. Para este estudo, assume-se a possibilidade de neutralização e alinhamento futuro dos padrões de mensuração (ex. metodologia *GHG Protocol*)
Fonte: IBRAM, Inventário de emissões de gases de efeito estufa do setor mineral 2024 – Ano Base 2022

Mantidas as intensidades de carbono atuais, as emissões da mineração brasileira poderão crescer entre **45% e 85% até 2050**, impulsionadas pela expansão da produção mineral. O cenário de inação mostra que as emissões, que hoje representam **12,8 $MtCO_2e$**, podem atingir até **23,6 $MtCO_2e$** em 2050.

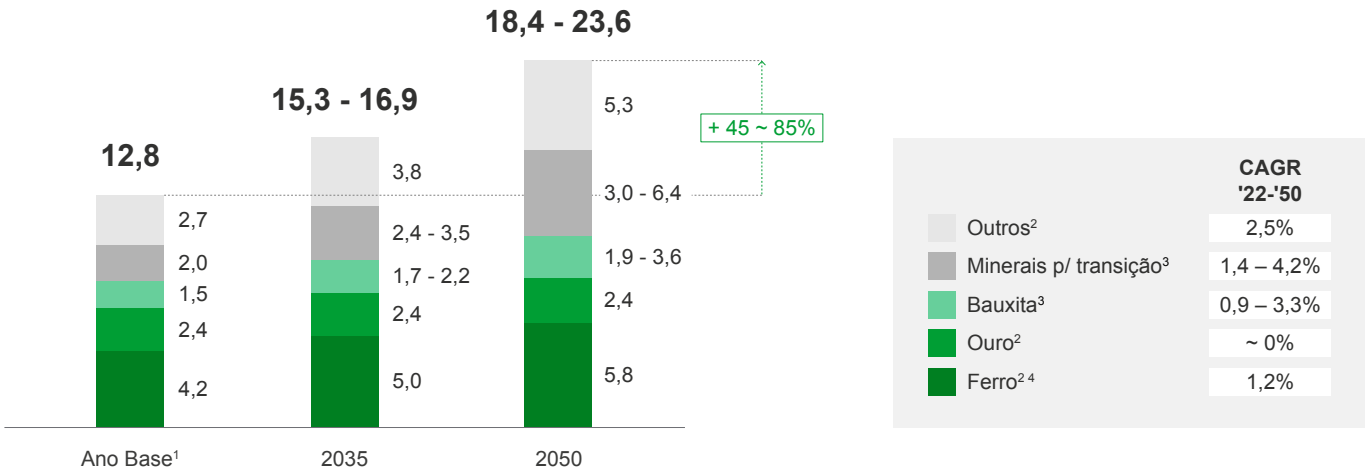
A evolução não é homogênea entre os minerais. O **ferro**, que responde pela maior parte das emissões atuais, apresenta crescimento moderado, com crescimento mais acelerado até 2035, refletindo taxas de expansão equivalentes a 1,2% ao ano no período 2022-2050. A **produção de bauxita** tende a aumentar entre 0,9% e 3,3% ao ano, enquanto os demais **minerais associados à transição energética** podem registrar crescimentos mais acelerados, variando entre 1,4% e 4,2% ao ano, dependendo do cenário considerado. O **ouro** mantém volume de produção estável.

As projeções foram construídas a partir de múltiplas fontes, incluindo os Estudos para o Plano Nacional de Mineração 2050 (PNM), além de dados da Agência Nacional de Mineração, IBRAM, relatórios de sustentabilidade de empresas do setor e entrevistas com a Coalizão. No caso específico dos **minerais para a transição energética**, as premissas utilizadas estão detalhadas no **Capítulo 4 deste documento**, permitindo maior clareza sobre a demanda desses insumos para a descarbonização global.

Adicionalmente, destaca-se que o estudo **contempla apenas as emissões diretas de mineração e beneficiamento**, em alinhamento com metodologia do inventário de emissões do setor desenvolvido pelo IBRAM, não incluindo etapas industriais de processamento subsequente para **cadeias além do ferro**. Deste modo, com a **expansão prevista da produção dos Minerais para a transição energética**, as emissões de processamento (ex. Níquel, Cobre) tendem a **ganhar maior relevância** e, caso o Brasil **avance na industrialização** dessas cadeias minerais (ex. lítio, grafite), **parte significativa poderá ocorrer em território nacional**.

Tal perspectiva não deve ser vista apenas como um **desafio climático**, mas sobretudo como uma **oportunidade estratégica para o Brasil** avançar em sua industrialização. A **expansão das cadeias de processamento mineral** pode impulsionar um **ciclo virtuoso de desenvolvimento econômico**, com maior geração de valor agregado, diversificação produtiva e fortalecimento da competitividade internacional do país. Esse movimento tem potencial para ampliar a base industrial, estimular a formação de mão de obra capacitada, atrair investimentos em tecnologia de ponta e acelerar o desenvolvimento em diferentes regiões. Ao mesmo tempo, essa oportunidade destaca a importância de **integrar soluções de descarbonização** ao longo das cadeias produtivas, assegurando que o avanço industrial se alinhe às metas climáticas.

Figura 4 - Emissões por minério ($MtCO_2e$) – Cenário de inação



1. Considera ano base 2022 **2.** Projeções de produção alinhadas às taxas de crescimento do PNM, com ajuste no carvão para exclusão de projetos cancelados **3.** 13 minerais selecionados para quantificação - mais detalhes no capítulo Minerais para a transição energética **4.** Considerou-se acréscimo de emissões por perda de eficiência operacional entre 7-24%, em ferro, bauxita, fosfato, estanho e carvão.
Fontes: Estudos para o PNM 2050; *United States Geological Survey (USGS)*; IBRAM; *International Energy Agency* (*IEA*); Relatórios de sustentabilidade; Entrevistas com membros da Coalizão

Para enfrentar o desafio do crescimento de emissões, torna-se fundamental construir um caminho de descarbonização que combine medidas de curto prazo com soluções estruturantes de longo prazo. Esse caminho se apoia em cinco grupos de alavancas: a substituição de combustíveis fósseis por alternativas de menor emissão; a eletrificação progressiva de frotas e a adoção de hidrogênio de baixo carbono; o aumento da eficiência e da inovação tecnológica; a ampliação do uso de energia renovável; e, por fim, a restauração de áreas como mecanismo de neutralização.

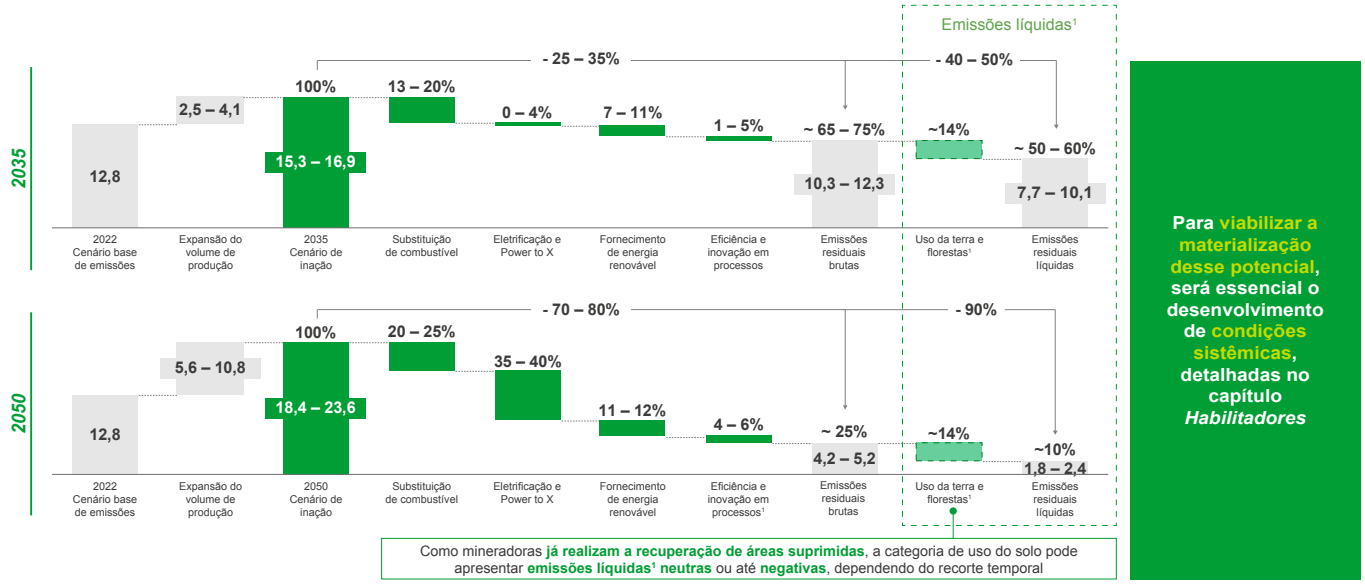
2.2 Mapeamento das alavancas para redução e estimativa do impacto das contribuições

A partir das estimativas desenvolvidas, o setor acredita ser potencialmente possível reduzir e neutralizar cerca de **40-50% de suas emissões até 2035** e até **90% em 2050**, em comparação ao cenário de inação. Esse potencial decorre da adoção combinada de diferentes alavancas, com destaque para a **substituição de combustíveis fósseis**, responsável pela redução de cerca de um quarto das emissões no horizonte 2050. A concretização desse potencial dependerá do **avanço de habilitadores sistêmicos,** como tecnologia e P&D, infraestrutura, financiamento, regulação e mecanismos de cadeia de valor que viabilizem a adoção em escala das alavancas identificadas.

A **eletrificação e soluções *power-to-X*** ganham protagonismo ao longo do tempo, podendo representar redução de até **40% das emissões em 2050**, à medida que a infraestrutura de energia avança e os custos das tecnologias caem. **Energia renovável adicional** e **ganhos de eficiência nos processos** somam contribuições relevantes, ainda que menores, reforçando o papel da inovação na transformação do setor.

Emissões de **uso da terra e florestas** representam uma dimensão estratégica da descarbonização. A recuperação de áreas suprimidas, já conduzida pelas mineradoras, tem potencial para gerar emissões líquidas neutras ou até negativas, a depender do horizonte temporal de análise. Esse fator evidencia o papel das soluções baseadas na natureza como complemento essencial às tecnologias industriais, ampliando a capacidade do setor de alinhar crescimento produtivo à neutralidade de carbono.

Figura 5 - Potencial de redução das emissões em 2035 e 2050 ($MtCO_2e$)



Notas: Emissões da produção de carvão consideradas dentro do bloco de emissões residuais **1.** Remoção de carbono a partir de áreas próprias e diretamente afetadas das empresas considerada como suficiente para neutralizar as emissões de uso da terra. A atual metodologia *GHG Protocol* não permite essa abordagem para cálculo de emissões líquidas, mas a contabilização do carbono sequestrado é uma oportunidade para as metas de neutralidade de carbono das mineradoras.
Fontes: IBRAM (Inventário de Emissões), Discussões da Coalizão

A **substituição do diesel** desponta como uma das alavancas mais relevantes para a descarbonização da mineração, dada a forte representatividade das emissões de combustão móvel, associadas principalmente aos caminhões fora de estrada. Para reduzir essa dependência, é fundamental compreender quais alternativas tecnológicas podem viabilizar a transição e quais barreiras ainda precisam ser superadas.

Essa substituição pode ocorrer por diferentes caminhos, cada um com oportunidades e desafios específicos.

Figura 6 - Caminhos para substituição de combustível, eletrificação e *power-to-X*

1. A **eletrificação das frotas de mineração** deve aumentar, principalmente em operações com **menor demanda de energia** e presença de **infraestrutura elétrica adequada**

2. **Escalar a eletrificação** exige rede elétrica estável, **carregadores robustos**, gestão cuidadosa de baterias e **planejamento de manutenção** para ambientes severos. **Autonomia limitada** e **tempos de recarga** ainda são pontos críticos para determinadas rotas

3. O contexto brasileiro favorece o uso de **biocombustíveis** no curto e médio prazo: **maturidade regulatória**, **produção consolidada**, **capacidade de expansão** e a adaptação da **infraestrutura ao uso de *blends*** permitem uso em motores existentes com pequenas modificações

4. As **células a hidrogênio** oferecem **bom alcance** e **recarga rápida**, mas dependem de uma **cadeia de hidrogênio de baixo carbono** com custo viável, logística segura e infraestrutura ainda em desenvolvimento no Brasil

» A **atratividade das tecnologias** varia conforme o perfil do site. A **eletrificação e os *trolleys*** (eletrificação de caminhões via cabos elétricos suspensos em rampas) mostram maior maturidade, enquanto **células a combustível** ainda estão em fase de testes globais. A decisão exige análise integrada de custos, disponibilidade da tecnologia e infraestrutura necessária

Até **2035**, os **biocombustíveis *drop-in*** (compatíveis com motores existentes, como biodiesel e HVO) devem liderar a transição. Eles exigem menor investimento, aproveitam a cadeia já estabelecida no Brasil e podem ser utilizados em motores existentes com adaptações mínimas, ainda que com custos de manutenção ligeiramente superiores ao diesel.

A Coalizão de Transportes projetou um cenário de intensificação dos *blends* de diesel renovável, com a adoção de B25 até 2035 e B50 até 2050. Esses *blends* correspondem à mistura de diesel fóssil com biocombustíveis, como biodiesel e diesel verde, sendo que B25 indica 25% de renovável na composição e B50, 50%. A elevação desses teores pode ocorrer por ajustes regulatórios, como a elevação de mandatos, e também por adesões voluntárias a níveis superiores, conforme viabilidade técnica e econômica. No setor de mineração, observa-se uma tendência nesse sentido, com pilotos e discussões que apontam para teores mais altos, como testes em B25 em aplicações fora de estrada.

A **eletrificação pura** demanda investimentos iniciais mais elevados e enfrenta limitações de autonomia, mas tende a ganhar competitividade à medida que o custo das renováveis cai e a densidade energética das baterias aumenta, sobretudo em minas de rotas fixas. Já o **hidrogênio de baixo carbono** deve ter adoção mais lenta, restringida pelo custo de produção e pela falta de infraestrutura adequada, mas com potencial de expansão no longo prazo.

Esse panorama indica que, até meados da próxima década, os biocombustíveis devem ocupar o papel central na transição, enquanto a eletrificação e o hidrogênio devem ganhar espaço gradualmente em horizontes mais longos, à medida que avanços tecnológicos e redução de custos tornem essas rotas mais competitivas.

Figura 7 - Viabilidade e compatibilidade de tecnologias

Tecnologia	Viabilidade tecnológica e econômica (2035)		Compatibilidade com uso na mineração (2035)	
Biocombustíveis (Biodiesel e *HVO*)	ALTO / BAIXO	• **CAPEX reduzido** em infraestrutura (tanques e bombas existentes, ajustes em vedações e mangueiras para *drop-ins*) • **Cadeia brasileira robusta**, com possibilidade de *blends* flexíveis caso o suprimento seja limitado • Possibilidade de **redução do custo do *HVO*** com aumento de escala	ALTO / BAIXO	• Permite uso do mesmo trem de força **com mínimas adaptações** de vedação/injeção (*HVO*, biodiesel) • Abastecimento rápido, mantendo **disponibilidade operacional** • Aumento de **custos de manutenção** em comparação ao diesel
Apenas bateria	ALTO / BAIXO	• Necessita **alto CAPEX** para nova infraestrutura • Bateria pura se torna competitiva com diesel **à medida que os custos de renováveis caem** e a manutenção é reduzida • Maior viabilidade em minas com **rotas fixas** e/ou com associação a *trolley assist*	ALTO / BAIXO	• Exige **bateria grande e pesada** para atender demandas de potência e padrões de uso • Bateria menor é possível com **recargas frequentes**, mas prejudica a operação contínua • Para eletrificação em massa em 2050 há necessidade de **aprimoramento da densidade energética**
Célula de Combustível H_2	ALTO / BAIXO	• Atualmente não viável devido **alto custo de H_2** • **Desafio de oferta de H_2** de baixo carbono • Maturidade e competitividade econômica esperadas em médio prazo • OPEX depende da **queda no custo da energia renovável**	ALTO / BAIXO	• Em teoria, melhor se adapta ao padrão de uso (**reabastecimento rápido reduz paradas**) e atende requisitos de **alta potência**

Nota: *HVO*: *Hydrotreated Vegetable Oil*, também conhecido como Diesel Verde. No cenário internacional, Biometano, Bio-GNC e Bio-GNL enfrentam limitações de oferta, principalmente pela ausência de comércio internacional estruturado e por restrições de infraestrutura em determinadas regiões. Já os *e-fuels* ainda estão em fase piloto — embora a primeira produção comercial seja prevista para 2030, a adoção em larga escala provavelmente não ocorrerá antes de 2040 devido a desafios tecnológicos. No Brasil, a Vale anunciou parceria para desenvolvimento de motor a etanol.
Fonte: Pesquisa documental, debates da Coalizão

O Brasil parte de uma posição privilegiada para viabilizar o processo de descarbonização. O país já conta com soluções consolidadas em escala, como o **etanol de 1ª geração, biodiesel e *HVO***, além de tecnologias em fase de expansão, como **etanol de 2ª geração, biometano e diesel verde avançado**, previstas para ganhar relevância na próxima década. O **hidrogênio de baixo carbono**, embora promissor, só deve alcançar competitividade em larga escala após 2040, diante dos desafios de custo e infraestrutura.

Figura 8 - Evolução de biocombustíveis no Brasil representa alternativa de descarbonização à eletrificação

		Descrição	Estágio de desenvolvimento	Expectativa para prod. em escala
Biocombustíveis	**Etanol 1ª geração**	Produção a partir de **matérias-primas à base de açúcar** (cana ou milho)		Produção em escala
	Etanol 2a geração	Produção a partir de componentes de **celulose da biomassa vegetal**		2035+
	Biodiesel (*FAME*)	Produção através de **transesterificação de fontes biológicas**		Produção em escala
	Diesel Verde (*HVO*)	Produção através do **hidrotratamento de óleos vegetais ou gorduras animais**		2030+
	Biometano	Produção através da **gaseificação da matéria orgânica**		2030+
H_2	**Hidrogênio de baixo carbono**	Produção com energia **renovável para alimentar a eletrólise da água**		2040+

P&D — Produção moderada — Produção em escala

Nota: *FAME (Fatty Acid Methyl Esters)* é um tipo de biodiesel produzido a partir de óleos vegetais ou gorduras animais.
Fonte: *Unleashing Brazil's Low-Carbon Hydrogen Potential,* pesquisa documental

Esse panorama evidencia uma provável trajetória: **biocombustíveis sustentam a transição no curto prazo, a eletrificação se consolida gradualmente e o hidrogênio completa o portfólio no longo prazo**. Com isso, o país se posiciona de forma única para alinhar sua mineração à agenda climática global.

2.2.1 Substituição de combustíveis

Figura 9 - Alavancas - Substituição de combustíveis

Alavancas	Análise de viabilidade atual	Referências
1 Acréscimo na substituição **parcial** do diesel por biocombustíveis na **frota sem necessidade de grandes modificações** nos motores (*drop-in* – B12 > B25/B30)[1 3 4]	Comercialmente disponível. No entanto, enfrenta barreiras logísticas como suprimento estável e armazenagem	Testes B25 na frota da Vale
2 Adoção de **biocombustíveis na frota**, com **substituição total ou parcial do diesel** por *blends* de maior proporção[2]	Tecnicamente viável; exige compatibilidade/ garantia do OEM ou *retrofit* de componentes. Custo de combustível mais alto; logística de suprimento segregada	Substituição total para biodiesel em maquinário pesados na operação de Boron da Rio Tinto
3 Acréscimo na substituição **parcial** do diesel por biocombustíveis em **equipamentos de combustão estacionária sem necessidade de grandes modificações** nos motores (*drop-in* – B12 > B25/B30) [3 4]	Comercialmente disponível; equipamentos estacionários modernos já aceitam B20 sem alteração. Misturas acima podem exigir ajustes simples em componentes (juntas e mangueiras)	Os geradores a diesel Cat podem funcionar com biocombustíveis e acomodam o uso de biodiesel e HVO há mais de uma década A Cummins divulga uma lista de modelos de motores aprovados para uso de B20
4 Adoção de **biocombustíveis** em **equipamentos de combustão estacionária, com substituição total ou parcial do diesel** por *blends* de maior proporção[2]	Tecnicamente viável; exige compatibilidade e/ou *retrofit* leve dos motores estacionários. Custo de combustível mais alto; logística de suprimento segregada	Uso de biodiesel 100% de palma (B100) em geradores estacionários da BBF em usinas termelétricas na Amazônia

Notas: 1. B12, B25, B30 representam misturas de 12%, 25% e 30% de biodiesel ao diesel fóssil. **2.** Inclui biodiesel, HVO, biometano e etanol **3.** Considera adição legal obrigatória de B25 devido à Lei do Combustível do Futuro, mais acréscimos voluntários de 5 p.p. na taxa adoção sugerida. B12 considerado devido ao ano de referência 2022 **4.** *Blend* do futuro B30 inclui biodiesel (FAME) e diesel verde (HVO)

2.2.2 Eletrificação e *power-to-X*

Figura 10 - Alavancas - Eletrificação e *power-to-X*

Alavancas	Análise de viabilidade atual	Referências
1 Implementar **pás elétricas e *LHDs*** visando substituir as alternativas a diesel por soluções mais limpas	Viabilidade moderada, dependente da infraestrutura elétrica na cava	Newmont – mina subterrânea de Borden (Canadá) *"all-electric"* com redução de ventilação e emissões BHP Escondida no Chile – uso de pá elétrica a cabo
2 Implantar ***trolley assist* em caminhões** de transporte, conectando-os a cabos aéreos durante as subidas para diminuir a necessidade de diesel nas rampas	Viável em rampas definidas; exige construção de linhas aéreas de contato e adaptação da frota, o que implica investimento inicial significativo	Minas Kansanshi, Sentinel e Cobre Panama da First Quantum operando com *trolley assist*
3 Implementar **caminhões movidos a bateria (*BEV*)** para substituir as alternativas a diesel	Viabilidade moderada, dependente da infraestrutura elétrica na cava; protótipos em teste	Colaboração entre a Rio Tinto e a BHP no teste da tecnologia de caminhões de transporte elétricos a bateria de grande porte em Pilbara, Austrália Ocidental
4 Implementar **caminhões fora-de-estrada *FCEV*[1]** substituindo caminhões a diesel por alternativas movidas a **célula de combustível de hidrogênio**	Protótipo avançado; exige eletrolisador (produção local)/garantia de abastecimento de H_2; custos potencialmente altos	Anglo American – Mogalakwena (Africa do Sul), desde maio de 2022 Fortescue – Pilbara (Austrália)- Protótipo H_2 em testes em Christmas Creek desde agosto de 2024

1. *Fuel Cell Electric Vehicle*

Eletrificação e hidrogênio: oportunidade de até R$94 bilhões em investimentos até 2050

A eletrificação da frota de caminhões fora-de-estrada e equipamentos como pás e *LHDs* e a adoção de soluções *power-to-X* no Brasil representam uma oportunidade de investimentos da ordem de R$ 77 a 94 bilhões, capaz de transformar a logística da mineração e atrair capital para tecnologias de baixo carbono.

A estimativa considera as **quatro alavancas em conjunto**: pás elétricas e *LHDs*, caminhões movidos a bateria (*BEV*)[1], caminhões movidos a célula de combustível (*FCEV*)[2] e sistemas de *trolley assist* para caminhões em rampas[3], em um **cenário de crescimento gradual da adoção dessas tecnologias**, apoiado por avanços em infraestrutura, financiamento e desenvolvimento tecnológico que permitam sua implementação em larga escala. Esses valores dão a dimensão da escala de recursos que será necessária para viabilizar a eletrificação e o uso de hidrogênio na mineração, consolidando essa alavanca como uma das mais transformacionais da agenda de descarbonização.

1. Custo médio de R$ 41 milhões por caminhão elétrico (premissa adotada pelo IBRAM no Relatório Técnico da Construção e Análise da Curva de Custo Marginal de Abatimento da Mineração) e de R$ 10 milhões por *LHD*. **2.** Oito células de 100 kW por caminhão *FCEV*, com valores unitários variando entre US$ 190 e 2.200 por kW. **3.** Investimento de R$ 80,5 milhões para um sistema de 2 km (premissa adotada pelo IBRAM no mesmo documento).

2.2.3 Energia renovável

Figura 11 - Alavancas - Energia renovável

Alavancas	Análise de viabilidade atual	Referências
1 Implementar ***PPAs* solares e eólicos** para eliminar o **escopo 2** e fomentar a eletromobilidade	Altamente viável no Brasil devido à maturidade dos contratos de *PPAs* - pode ser implantado rapidamente	Vale: complexo solar Sol do Cerrado suprindo ~16 % da demanda da empresa no país com redução de ~134 kt CO_2 ano CBA: capacidade instalada para gerar 100% de energia elétrica renovável, por meio de 21 usinas hidrelétricas e 2 complexos eólicos
2 Adotar **solar fotovoltaico *on-site*** (pilhas, telhados) para instalar **PV em áreas não utilizadas** e contribuir para o **suprimento parcial da planta**	Alta viabilidade e *payback* rápido	Rio Tinto (AUS): Mina de minério de ferro Gudai-Darri com 34 MW de energia solar instalada

Nota: *PPAs (Power Purchase Agreements)* são contratos de compra e venda de energia de longo prazo.

2.2.4 Eficiência e inovação em processos

Figura 12 - Alavancas - Eficiência e inovação em processos

Alavancas	Análise de viabilidade atual	Referências
1 Aumentar a **eficiência de rotas** (digitalização, telemetria e sequenciamento) e **eficiência dos veículos** (pneus *LRR* e motores) para reduzir o consumo de diesel	*Softwares* e tecnologias disponíveis; baixo investimento	Uso de *digital twins* integrados com IA para sequenciamento de atividades e rotas pela BHP Uso de dados de telemetria para otimização de rotas pela Rio Tinto Michelin: "Pneus *Energy Efficiency*" com menor resistência a rolamento reduzindo até 5 % do consumo
2 **Otimizar equipamentos de britagem e moagem** para maior eficiência energética	*Softwares* disponíveis; baixo investimento	Modelos matemáticos calibrados para perfuração e desmonte, britagem primária (giratório) e moagem SAG/Ball na Compañía Minera Antamina
3 **Utilização de correias transportadoras** para substituir parte do transporte realizado por caminhões	Tecnologia madura; alto impacto em CO_2e custo, porém requer obra civil e redesenho do *layout*	Sistema *truckless* da S11D da Vale com ~70 km

Nota: *LLR (Low Rolling Resistance)* são pneus de baixa resistência ao rolamento, projetados para reduzir a perda de energia durante a rotação

2.2.5 Uso da terra e florestas

As emissões associadas ao uso da terra são tema importante para a descarbonização da mineração. As atividades do setor no Brasil **estão sujeitas a condicionantes legais que determinam compensações ambientais e florestais obrigatórias**. Normas federais e estaduais já **exigem que as empresas implementem medidas de compensação**, como previstas em Programas de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) e Planos de Fechamento de Mina (PFM).

Além dessas exigências legais, mineradoras têm **oportunidade adicional de neutralização de emissões** que pode ser explorada por meio de ações voluntárias. Tais iniciativas vão além da obrigação regulatória, permitindo que as mineradoras ampliem seus impactos positivos, gerando benefícios ambientais adicionais e servindo como alavanca para apoiar metas de neutralidade de emissões no setor.

Em adição à recuperação de áreas, as mineradoras também contribuem com o combate ao desmatamento através da proteção de áreas: **em 2023, mineradoras preservaram mais de 1 milhão de hectares de vegetação nativa**.

Apesar do potencial de impacto, o uso de soluções de neutralização para atingir as metas de redução das mineradoras é um tema ainda não endereçado pelas metodologias internacionais. Esse tema é explorado de maneira mais aprofundada no capítulo *Habilitadores*.

Figura 13 - Restauração e proteção de terras no Brasil pela indústria da mineração

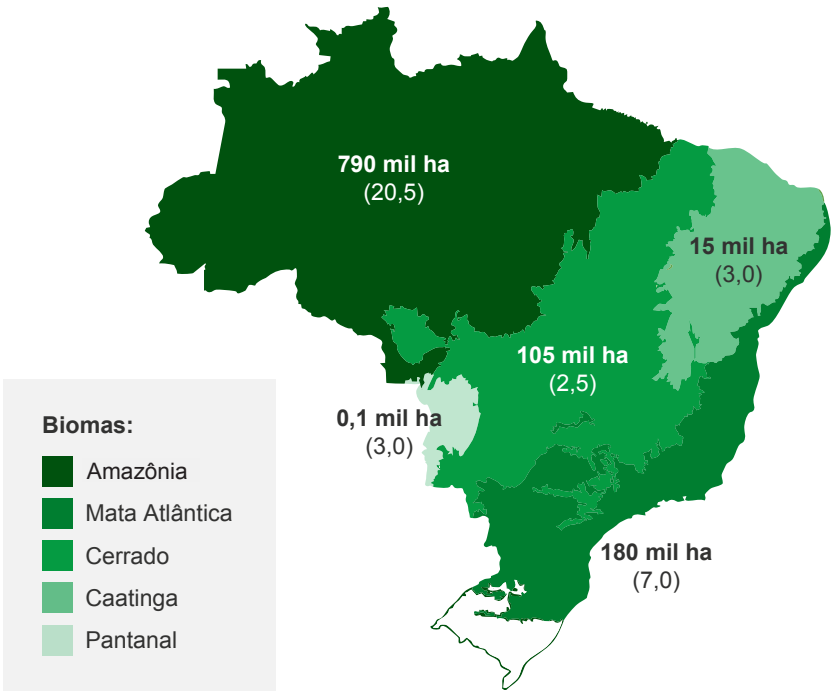
1,1M

de hectares protegidos em 2023 pelo setor

~10:1

é a razão entre áreas protegidas[1] e impactadas[2] em 2023

Distribuição de áreas protegidas[1] e seus fatores de proteção[3] por bioma[4]



1. Área geograficamente definida que é designada, regulada ou gerida para lograr objetivos específicos de preservação, incluindo as Áreas de Preservação Permanente (APPs) e Reservas Legais. **2.** Área geográfica onde se localizam as estruturas minerárias e de apoio, incluindo vias de acesso interno e que sofrerão alterações físicas e biológicas decorrentes da implantação e operação do empreendimento. **3.** Relação de áreas protegidas por áreas impactadas. **4.** Aproximação calculada a partir do percentual por estado de cada bioma em conjunto com dados do IBRAM por estado.
Fontes: Resultados ESG Mineração do Brasil 2024, IBRAM; MapBiomas



03

Cadeia do Minério de Ferro: contribuições da mineração para a descarbonização

A descarbonização da cadeia do minério de ferro pode ser analisada sob diferentes ângulos considerando o grau de influência das empresas de mineração. O setor pode contribuir de quatro formas principais: (1) fornecendo **insumos de baixo carbono para siderurgia**, como pelotas e briquetes *DR-grade*[1]; (2) colaborando com fornecedores estratégicos para **reduzir emissões na navegação de longo curso**; (3) descarbonizando **etapas industriais associadas, como a pelotização**; e (4) reduzindo **emissões logísticas ligadas ao transporte ferroviário**.

Vistas em conjunto, essas frentes podem representar uma contribuição expressiva: em 2050, **contando com a evolução de condições sistêmicas e com a aceleração da transição energética,** a mineração brasileira pode ajudar a viabilizar reduções de **100 a 110 $MtCO_2e$ ao longo da cadeia do minério de ferro.**

A expansão da produção brasileira de pelotas e briquetes *DR-grade* pode viabilizar parte dos insumos para a migração da siderurgia da rota integrada (*BF-BOF*[2]) para rotas de redução direta ao redor do mundo. O potencial é da ordem de **80 $MtCO_2e$ em 2050**, evidenciando o papel estratégico do Brasil como fornecedor global de insumos para aço de baixo carbono.

A exportação de minério brasileiro está associada a emissões expressivas de navegação de longo curso. Ao colaborar com armadores e fornecedores de combustíveis para acelerar a adoção de soluções de baixo carbono, a mineração pode contribuir para as metas da Organização Marítima Internacional (*IMO*) com reduções de **15 a 25 $MtCO_2e$ em 2050**, a depender do crescimento de volume exportado e também da definição do alvo de emissões residuais para o período.

O processo de pelotização também oferece espaço para descarbonização por meio de substituição de combustíveis, eficiência energética, uso de eletricidade renovável e inovações de processo. O potencial de redução foi estimado em **4 a 5 $MtCO_2e$ em 2050**, reduzindo a intensidade dessa operação fundamental para a cadeia do aço.

Por fim, o transporte ferroviário do minério de ferro representa parte relevante das emissões deste modal. A aplicação de alavancas como eficiência operacional, biocombustíveis e eletrificação parcial pode reduzir em até **1 a 2 $MtCO_2e$ em 2050**, contribuindo para uma logística mais limpa e eficiente.

Figura 14 - Oportunidades de contribuição ao longo da cadeia do ferro

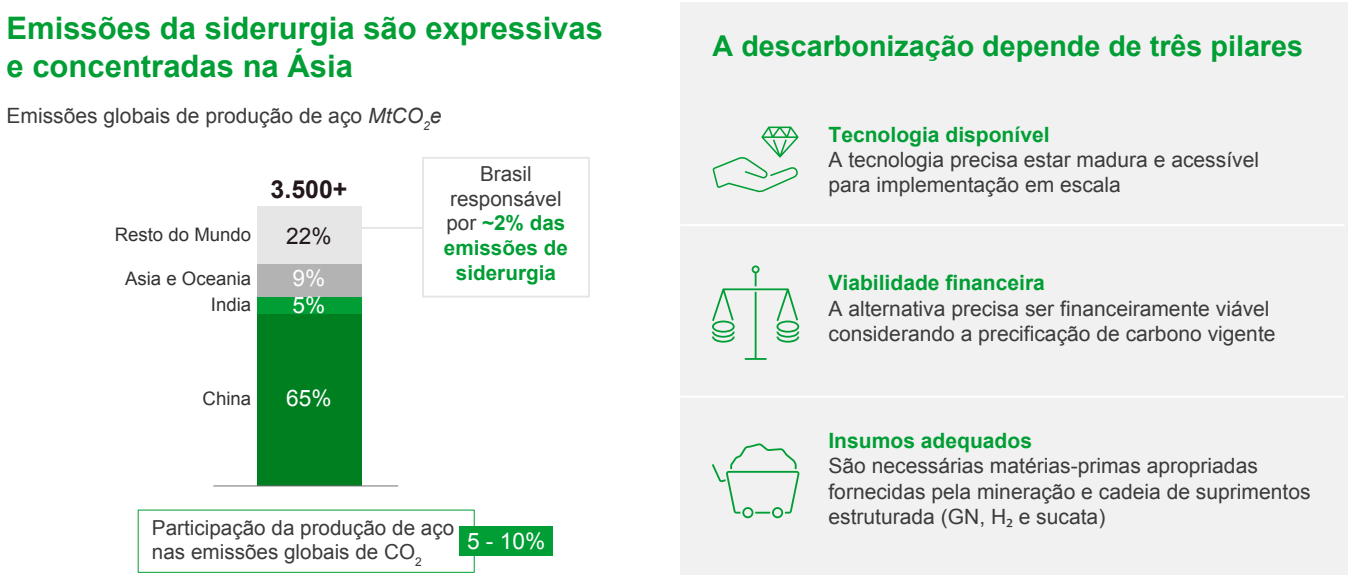


1. *DR-grade* (*Direct Reduction grade*, ou grau para redução direta) refere-se a formas de minério de ferro processado (como pelotas ou briquetes) com características adequadas ao uso em processos de redução direta **2.** *Blast Furnace – Basic Oxygen Furnace*, rota integrada de produção de aço em que o minério de ferro é reduzido em alto-forno (*BF*) e depois convertido em aço líquido em convertedor a oxigênio básico (*BOF*).

3.1 Expansão de insumos para produção de aço de baixo carbono

A siderurgia é responsável por uma parcela expressiva das emissões globais, da ordem de 5% a 10% do total das emissões mundiais nos últimos anos.

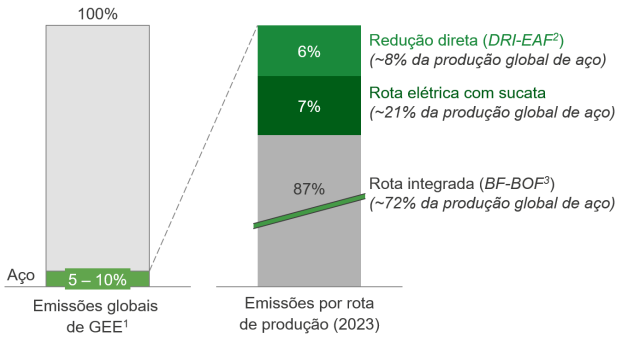
Figura 15 - Emissões do aço e fatores para sua descarbonização



Fonte: *Global Financial Markets Association (GFMA)* e BCG: Mercados Financeiros Climáticos e a Economia Real

Grande parte desse **impacto decorre da rota integrada tradicional, ou *BF-BOF*** (alto-forno e conversor a oxigênio), que é responsável por cerca de 70% da produção mundial de aço e quase 90% das emissões do setor. A **transição para rotas de redução direta (*DR*), com uso de gás natural e hidrogênio de baixo carbono**, é fundamental para reduzir a pegada de carbono do aço, mas **depende de múltiplos fatores**, incluindo tecnologia, viabilidade financeira e insumos adequados.

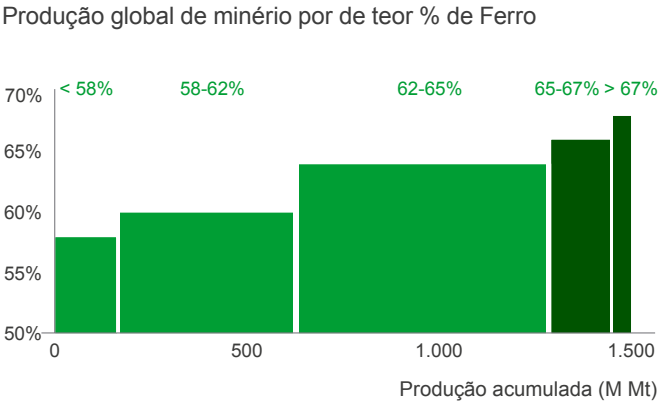
Figura 16 - Emissões do aço por rota



1. Gases de Efeito Estufa **2.** *Direct Reduction Iron - Electric Arch Furnace* - rota de redução direta, sem etapa de autoforno, que exige insumos *DR-grade* e tem emissões reduzidas em comparação à rota *BF-BOF* **3.** Blast Furnace – Basic Oxygen Furnace- rota integrada de produção de aço em que o minério de ferro é reduzido em alto-forno (*BF*) e depois convertido em aço líquido em convertedor a oxigênio básico (*BOF*).
Fonte: *World Steel Association*

O processo de redução direta, apesar de menos emissor, **tem requisitos mais elevados de pureza para o minério de ferro usado**. Atualmente, uma parcela pequena da produção mundial atende os requisitos para rotas de redução direta (*DR-grade*), o que configura mais um desafio para a descarbonização do aço.

Figura 17 - Desafio de fornecimento: minério de alta qualidade e baixo custo para rotas *DR*



Nota: O projeto Simandou (Rio Tinto), com teor de ferro comparável ao de Carajás (65–68%), tem previsão de entrada em operação nos próximos anos, ampliando a oferta global de *DR-grade*
Fonte: *Institute for Energy Economics and Financial Analysis: Iron Ore Quality a Potential Headwind to Green Steelmaking* (junho 2022)

Além do minério de alto teor, as rotas de redução direta **dependem também de acesso a outros insumos a preços competitivos como gás natural e energia limpa para produção de hidrogênio**. Como forma de otimizar acesso aos recursos necessários e o posterior transporte a centros consumidores, a indústria do aço tem colaborado com mineradoras e produtores de energia para construir ***hubs* integrados conectando recursos minerais, vetores energéticos competitivos e centros consumidores**.

1 *Hubs* são alavancas estratégicas para acelerar a transição do aço verde

Permitem reconfigurar a cadeia de valor global da siderurgia

Concentram ativos buscando a melhor combinação entre:

- Acesso a minério de ferro
- Acesso a gás natural e/ou hidrogênio de baixo carbono
- Proximidade com grandes centros consumidores

Viabilizam a busca pela melhor combinação técnico-econômica

2 Execução depende de um ecossistema colaborativo robusto

Alinhamento entre mineradoras, produtores de energia, investidores, governos e clientes

Coordenação logística eficiente e integrada

Contratos de longo prazo que assegurem viabilidade econômica

Políticas públicas que incentivem investimentos e inovação

3 O Brasil está estrategicamente posicionado para liderar

Minério de ferro de alto teor e capacidade instalada de pelotização

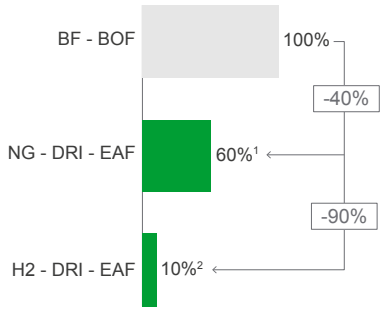
Acesso competitivo a fontes renováveis de energia

Infraestrutura logística existente (portos, ferrovias)

Potencial para atrair investimentos internacionais e consolidar hubs integrados

Nesse contexto, **a mineração brasileira pode desempenhar um papel estratégico** com suas reservas de minério de ferro de alto teor, capazes de alimentar rotas de redução direta que tem emissões reduzidas em comparação à rota integrada. Enquanto a produção de aço pela rota integrada *BF-BOF* emite, em média, 2,32 tCO_2e por tonelada, a rota *DR* baseada em gás natural pode reduzir essas emissões em cerca de 40% e a rota *DR* a hidrogênio, em até 90%.

Figura 18 - Emissões vs. rota *BF-BOF*



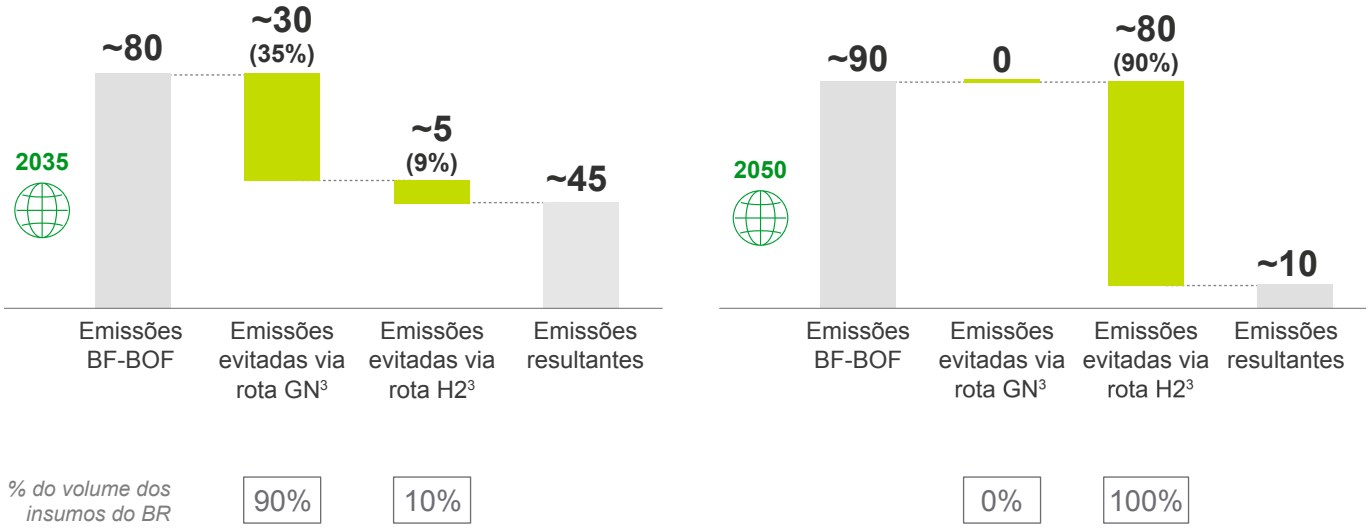
1. Considera fatores de emissões atuais do *Sustainability Indicators 2024 report* **2.** Considera eletricidade a partir de fontes renováveis
Fonte: *World Steel Association; Midrex*

A evolução do *mix* de rotas tecnológicas até 2050 terá papel central na descarbonização da siderurgia global. Para este estudo, projeta-se que, em 2035, os insumos *DR-grade* provenientes do Brasil sejam majoritariamente direcionados à rota de redução direta com gás natural (90%), com participação inicial da rota a hidrogênio (10%). Em 2050, o cenário se torna mais ambicioso, com 100% dos insumos brasileiros voltados às rotas a hidrogênio de baixo carbono, viabilizando redução expressiva nas emissões da produção global de aço.

Em termos de volume, estima-se que a oferta brasileira alcance **45 Mton de insumos *DR-grade* em 2035**, volume suficiente para viabilizar a produção de aproximadamente **35 Mton de aço globalmente** por rotas de redução direta. Se esse mesmo volume fosse produzido pela rota integrada tradicional (*BF-BOF*), as emissões associadas seriam da ordem de 80 $MtCO_2e$. Considerando o *mix* projetado - com 90% da produção via gás natural e 10% via hidrogênio - as emissões seriam de 45 $MtCO_2e$, resultando em redução **de 35 $MtCO_2e$** globalmente.

Para 2050, o potencial se amplia. A projeção é que o Brasil possa fornecer **50 milhões de toneladas de insumos *DR-grade*,** viabilizando cerca de **40 milhões de toneladas de aço** globalmente em rotas totalmente baseadas em hidrogênio de baixo carbono. Nessa hipótese, a produção via rota *BF-BOF* geraria emissões da ordem de **90 $MtCO_2e$**, enquanto a adoção integral da rota a hidrogênio reduziria esse valor para **10 $MtCO_2e$**, representando uma **redução de aproximadamente 80 $MtCO_2e$** globalmente.

Figura 19 - Redução global de emissões habilitadas por insumos brasileiros *DR-grade* (comparação entre rotas *DR* vs *BF-BOF*, Mt CO_2e)



1. Projeção considera acréscimo de volume de pelotização atingindo a capacidade de 26,4Mton para Samarco (Relatório de investidores 2Q2025) e 50Mton para Vale (Formulário de referência 2025) antes de 2035. Após 2035 não há crescimento de capacidade de pelotas. Briquetes crescem de 2,2Mton em 2024 para 10Mton em 2035 e 21Mton em 2050, assumindo crescimento proporcional no período. Considera parcela de *DR-grade* de 50% para Vale e 60% para Samarco. **2.** Considera fator de 1,46 para proporção de carga metálica alimentada no forno e 0,92 para proporção de *DR* alimentada no *EAF* **3.** Considera 2,32t CO_2/t de aço na rota *BF-BOF* e reduções de ~40% para rota a GN e ~90% para a rota a H_2, assumindo que nenhum insumo *DR* será destinado para rotas *BF-BOF*. Considera eletricidade de fontes renováveis para H_2.
Fontes: Relatórios de sustentabilidade; Entrevistas com membros da Coalizão; *World Steel Association; Midrex*.

Como mencionado, o fornecimento de insumos *DR-grade* em volumes adequados e preços competitivos é apenas um dos complexos desafios que a indústria do aço precisará resolver em sua jornada de descarbonização, que dependerá de seu próprio conjunto de habilitadores sistêmicos e adaptação de cadeias globais de produção muito além da mineração. A utilização efetiva desses insumos em rotas de baixo carbono **dependerá do desenvolvimento da capacidade siderúrgica no mundo para processá-los** segundo as exigências tecnológicas das rotas *DR*, o que envolverá **investimentos de grande porte.** Além disso, essa expansão exigirá **incentivos e viabilizadores adequados para a indústria do aço,** que precisará equilibrar a crescente demanda por aço de baixo carbono com sua capacidade de investimento e limitações do parque industrial existente, composto por ativos de longa vida útil.

Figura 20 – Alavancas da cadeia do minério de ferro – Produtos para siderurgia

Alavancas	Análise de viabilidade atual	Referências
1 Adaptar/expandir **linhas de pelotização existentes para *DR-grade***, para fornecer pelotas de alta pureza que habilitam rotas *DRI-EAF* a gás ou hidrogênio renovável	*Know-how* instalado, risco técnico baixo; dependente da disponibilidade de minérios com alto teor de ferro e teores controlados de contaminantes como fósforo e alumina	Produção de pelotas grau *DR* da Samarco Plantas da Vale em Omã
2 Utilizar a **aglomeração a frio para formação de briquetes**, transformando finos de minério em briquetes sem sinterização nem forno de pelotas, viabilizando rotas *DR* ou carga parcial em alto-fornos	Plantas em operação; testes sendo realizados na siderurgia	Planta da Vale em Tubarão

3.2 Colaboração com fornecedores na navegação de longo curso

A navegação de longo curso, responsável por parcela relevante das emissões na exportação de minério brasileiro, entra em um novo ciclo de transformação regulatória. O ***International Maritime Organization (IMO) Net Zero Framework***, aprovado em 2025 e com entrada em vigor prevista para 2027, ainda dependente da adoção formal, estabelece uma regulação global voltada para a meta de emissões líquidas zero até 2050 no transporte marítimo internacional.

Esse mecanismo cria um sistema de precificação setorial de carbono, no qual navios não conformes deverão comprar créditos de remediação ou pagar multas, enquanto embarcações que cumprirem os limites receberão créditos negociáveis. Além disso, um fundo internacional recolherá recursos das penalidades para reinvestir em tecnologias e soluções sustentáveis para o setor.

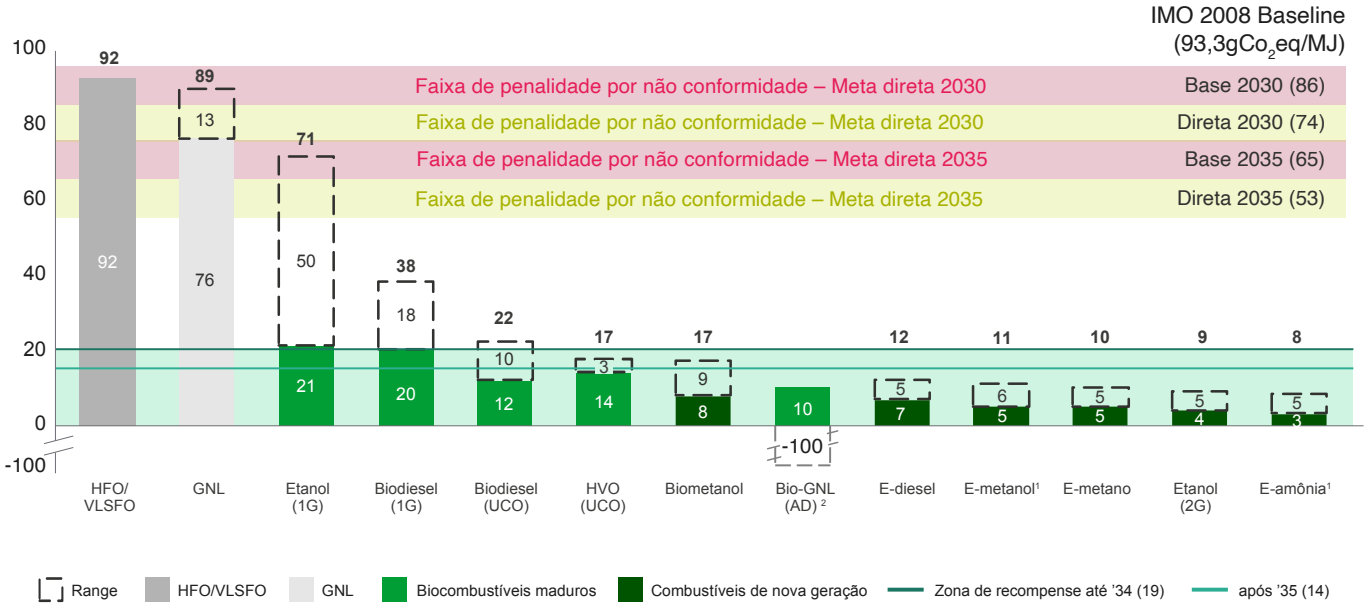
A implicação é clara: ao longo das próximas décadas, **apenas combustíveis de baixo carbono terão condições de atender às exigências regulatórias**.

Isso deve acelerar o desenvolvimento e a adoção de alternativas como biocombustíveis avançados, metanol verde, amônia e hidrogênio, ao mesmo tempo em que abre novas oportunidades de mercado para fornecedores capazes de assegurar um fluxo estável desses insumos.

Nesse cenário, **a mineração tem papel indireto, mas importante**, ao colaborar com armadores e fornecedores para viabilizar soluções de navegação de baixo carbono, reforçando o alinhamento da cadeia logística do minério brasileiro às metas climáticas globais.

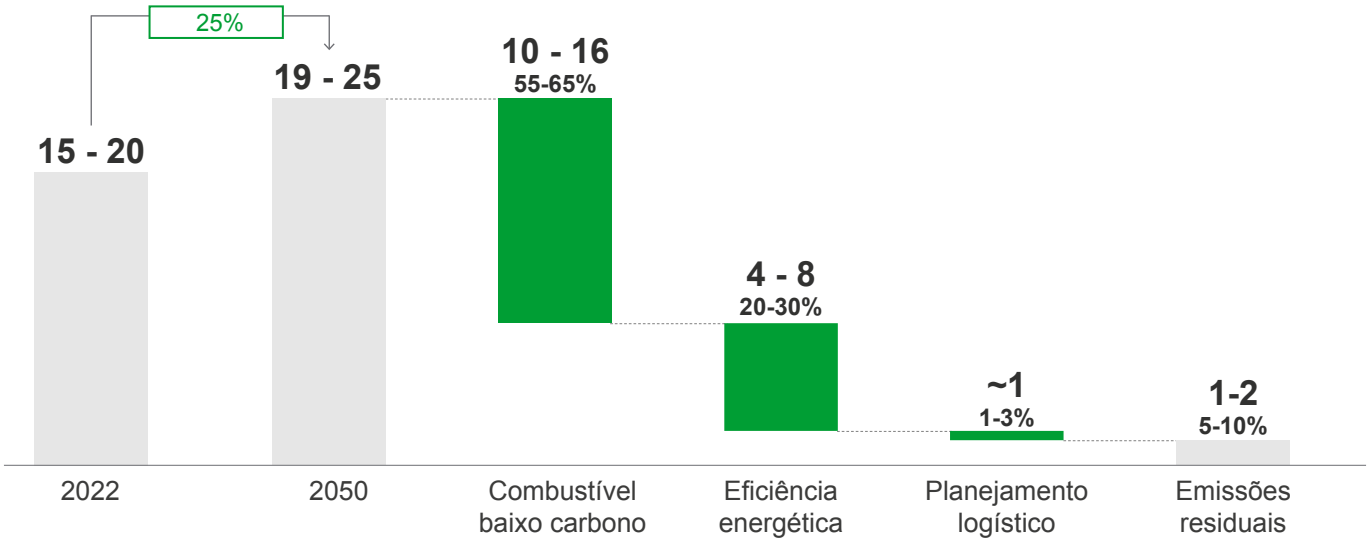
A exportação de minério de ferro brasileiro associada à navegação de longo curso tem emissões estimadas entre 15 e 20 $MtCO_2e$ em 2022. Esse volume pode ser reduzido substancialmente com a combinação de **eficiência energética e adoção de combustíveis de baixo carbono**. O papel da mineração, nesse contexto, **é colaborar com fornecedores e armadores**, sinalizando a importância da transição energética no mercado de frete transoceânico e apoiando o desenvolvimento de soluções em escala. A redução potencial é significativa e dependerá de definições na regulação da *IMO* sobre o alvo de emissões residuais a ser perseguido pelo setor.

Figura 21 - Intensidade de GEE entre combustíveis (WTW em gCO_2e/MJ)



Notas: Lista de combustíveis do gráfico não é exaustiva; *HFO/VLSFO: Heavy Fuel Oil* (óleo combustível pesado) / *Very Low Sulphur Fuel Oil* (óleo combustível de baixo teor de enxofre); GNL: Gás Natural Liquefeito; *UCO: Used Cooking Oil* (óleo de cozinha usado); *HVO (UCO): Hydrotreated Vegetable Oil* obtido a partir de óleos residuais, como óleo de cozinha usado; *Bio-GNL (AD)*: biogás liquefeito (*biomethane LNG*), obtido via digestão anaeróbia (*Anaerobic Digestion*) de resíduos orgânicos.
1. O impacto da chama-piloto para amônia ou metanol não foi considerado; em geral, impacto é baixo quando se utilizam biocombustíveis, mas pode aumentar de forma significativa a intensidade de carbono caso contrário (até 13% de requisitos de *HFO*) **2.** No caso da digestão anaeróbica, o índice de carbono pode variar de acordo com a matéria-prima utilizada.
Fontes: *Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping*; IMO – MEPC 83; *Global Centre for Maritime Decarbonisation (GCMD)*; FuelEU Maritime; Argus; *International Energy Agency (IEA)*

Figura 22 - Emissões de navegação de longo curso de exportação de minério de ferro a partir do Brasil – 2050 ($MtCO_2e$)



Notas: Estimativa baseada nas emissões da Vale, considerando sua participação nas exportações proporcional à sua participação na produção de minério de ferro. Considera que volume de exportações acompanha o crescimento da produção do minério de ferro no Brasil. Considera meta *IMO* de emissões *Net-Zero* em 2050 - essa meta ainda precisa ser definida pela *IMO* e poderá resultar em emissões residuais diferentes das projetadas.
Fontes: Vale; *International Maritime Organization (IMO)*; DNV – *Maritime forecast to 2050*

Figura 23 - Alavancas da cadeia do minério de ferro – Navegação de longo curso

Alavancas	Análise de viabilidade atual	Referências
1 Priorizar contratos de afretamento que exijam o uso de **navios *dual-fuel* (GNL, metanol, amônia)** ou embarcações movidas a **combustível de baixo carbono (biodiesel, etanol),** viabilizando a **transição energética da frota**	Tecnologia disponível *(dual-fuel)*; embarcações dedicadas dependem de novos investimentos e contratos de longo prazo	Vale realizando testes com B24 pelo programa *Ecoshipping* BHP com cinco navios graneleiros *Newcastlemax dual-fuel* a GNL em 2020 Anglo American com dez navios graneleiros Capesize+ *dual-fuel* a GNL
2 Priorizar contratos que exijam **sistemas de eficiência energética** em navios como *slow steaming*, tintas antiatrito, uso de velas, etc.	Tecnologias disponíveis; investimentos moderados (pintura) a altos (*rotor sail*); dependem de perfil de rota	Uso de velas rotativas em um navio da MOL para operação da Vale Uso de tintas a base de silicone no navio Liwa Max da Vale Uso de velas infláveis como a WISAMO do Grupo Michelin
3 Implantar **planejamento logístico integrado (porto–mina–navio),** reduzindo **esperas em porto**, aumentando **taxa de ocupação** dos navios, percentual de *backhauling* e evitando partidas subótimas	Tecnologia operacional em uso; depende de integração entre sistemas, além de coordenação entre áreas de planejamento e operações	Vale, BHP e Rio Tinto com Centros de Operações Integradas para ajustar planejamento logístico e otimizar embarques

Fontes: Desafios e Trajetórias Nacionais para Combustíveis Marítimos (EPE); Caprace, J.-D. et al.*Sustainable Shipping: Modeling Technological Pathways Toward Net-Zero Emissions in Maritime Transport (Part I) - Sustainability*, 2025

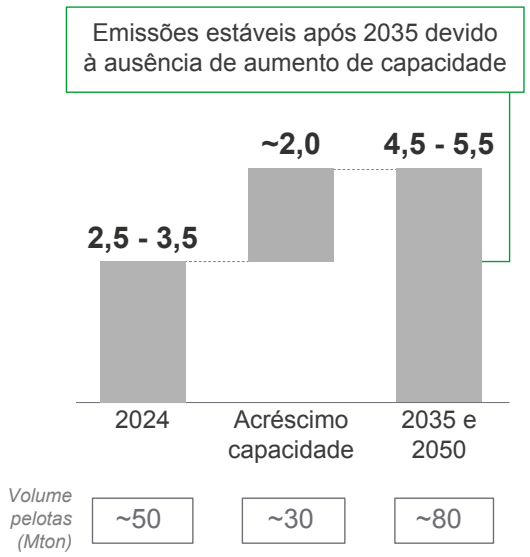
3.3 Descarbonização da etapa de pelotização

O processo de pelotização é atualmente responsável por emissões estimadas entre 2,5 e 3,5 $MtCO_2e$, valor que pode chegar a 4,5-5,5 Mt em 2035 com a expansão da produção.

Diversas alavancas podem reduzir essas emissões, incluindo o uso de **carvão vegetal, biocombustíveis, eletricidade renovável e inovação de processos**.

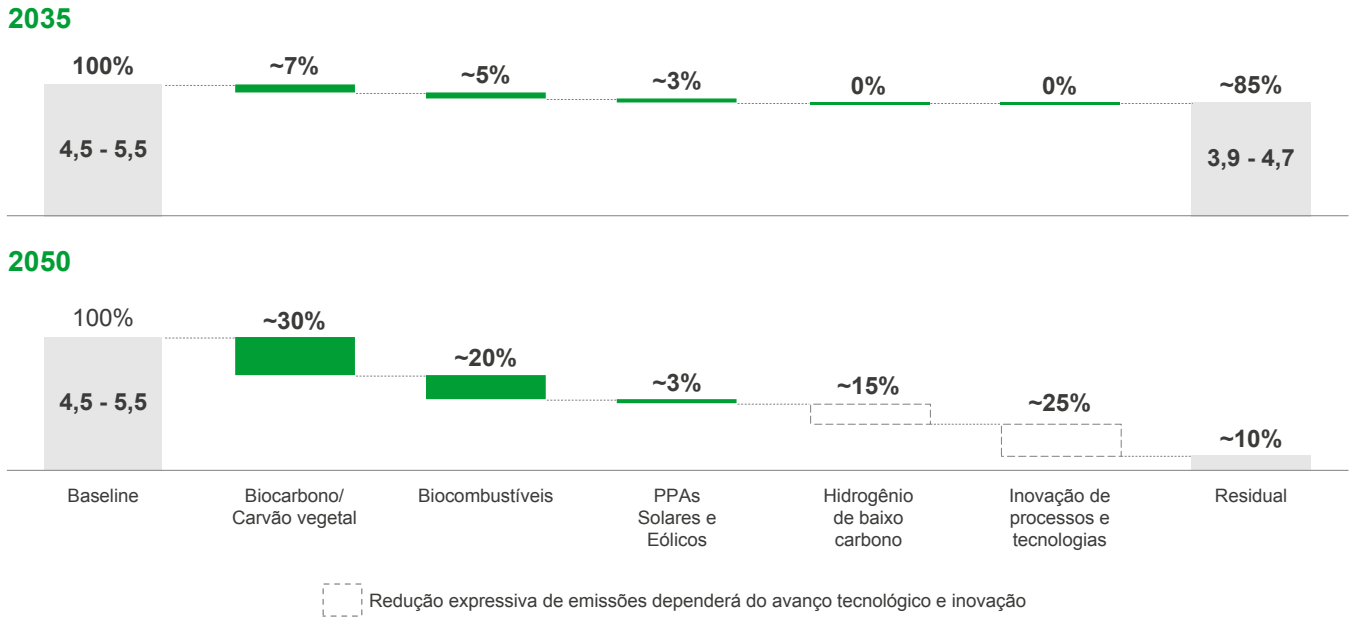
Em 2035, a substituição de combustíveis fósseis pode **reduzir emissões em até 15%**. Já em 2050, foram avaliadas **reduções próximas a 90%,** equivalentes a 4-5 $MtCO_2e$. A materialização dessas projeções **dependerá de inovação de processos e tecnologias ainda não maduras** – como hidrogênio de baixo carbono – ou da **expansão mais ambiciosa da produção e distribuição de biocombustíveis e biomassa**. Como aprofundado no capítulo *Habilitadores,* o avanço dessas soluções dependerá de requisitos de tecnologia, infraestrutura, regulação, financiamento, dentre outros.

Figura 24 - Baseline de Emissões - 2035 e 2050 ($MtCO_2e$)



1. Projeção considera utilização da capacidade reportada de 26,4Mton para Samarco (Relatório de investidores 2Q2025) e 50Mton para Vale (Formulário de referência 2025) antes de 2035
Fontes: Relatórios de sustentabilidade; *GHG Protocol*; Entrevistas com membros da Coalizão

Figura 25 - Potencial de redução do Escopo 1 e 2 de pelotização (M tCO_2e)



Fontes: Relatórios de sustentabilidade; *GHG Protocol*; Entrevistas com membros da Coalizão

Figura 26 - Alavancas da cadeia do minério de ferro – Pelotização

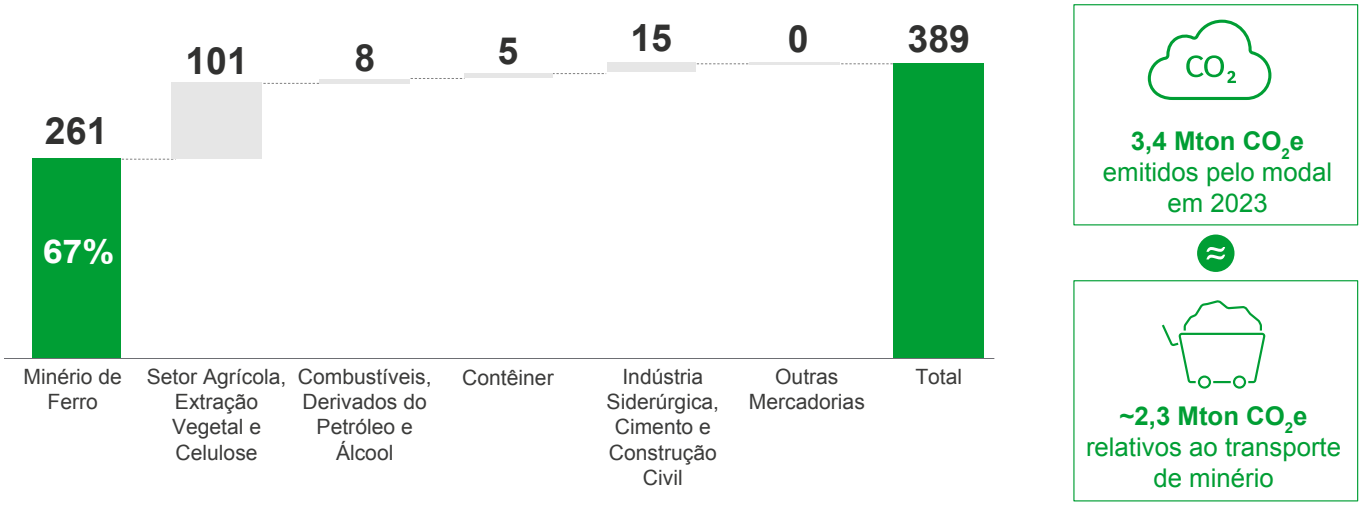
Alavancas	Análise de viabilidade atual	Referências
1 Empregar **biocarbono/carvão vegetal durante a pelotização** com o objetivo de substituir parte do carvão no processo de queima	Piloto viável; depende de biomassa estável e ajustes térmicos no forno; desafios associados a menor densidade, risco de combustão e logística mais complexa	Pelotizadora da Vale em Vargem Grande (MG) Pelotizadoras da Samarco
2 **Utilizar biocombustíveis** como bio-óleo ou biometano **como substituto ao gás natural** nos fornos de pelotização	Tecnologia validada em testes industriais; disponibilidade contínua e capacidade de escalar produção e distribuição limitadas	Parceria entre Samarco e Aperam BioEnergia Planta de pelotas HYBRIT da LKAB em Malmberget, Suécia
3 Implementar ***PPAs* solares e eólicos** para eliminar o **Escopo 2** e fomentar a eletromobilidade	Altamente viável no Brasil devido à maturidade dos contratos de PPAs - pode ser implantado rapidamente	Vale: complexo solar Sol do Cerrado suprindo ~16 % da eletricidade da empresa com redução de ~134 kt CO_2 ano CBA: capacidade instalada para gerar 100% de energia elétrica renovável, por meio de 21 usinas hidrelétricas e 2 complexos eólicos
4 Utilizar **hidrogênio de baixo carbono** como fonte de calor nos fornos de pelotização, substituindo parcial ou totalmente o gás natural	Tecnologia emergente em fase piloto; requer adaptação de queimadores, fornecimento confiável de H_2 e infraestrutura de segurança	Projeto HYBRIT da LKAB (Suécia) Piloto com eletrólise da Ferrexpo (Ucrânia) Parceria da Samarco com Eletrobrás e SMS Group para desenvolver H_2 verde para substituir GN nos fornos
5 Empregar **captura de CO_2 em fornos ou caldeiras**, para eliminar emissões via injeção em reservatório geológico	Tecnologia madura na siderurgia; requer proximidade de poços e transporte de CO_2; CAPEX e OPEX elevados	Estudo Vale e RTI International – solvente eCO_2Sol™ em Tubarão Estudo LKAB Plantas de pelotas Kiruna & Malmberget (Suécia) Protocolo de intenções da Petrobras, Findes[1] e Governo do Espírito Santo para estudos de CCUS e produção de hidrogênio de baixo carbono

Nota: *PPAs (Power Purchase Agreements)* são contratos de compra e venda de energia de longo prazo.
1. Federação das Indústrias do Espírito Santo

3.4 Redução de emissões logísticas ligadas ao transporte ferroviário

O transporte ferroviário é responsável por cerca de 3,4 $MtCO_2e$ ao ano no Brasil, dos quais aproximadamente 70% estão vinculados ao minério de ferro. A expansão da produção mineral pode aumentar as emissões de forma expressiva até 2050.

Figura 27 - Transporte ferroviário por mercadoria (Bilhões de TKU[1])

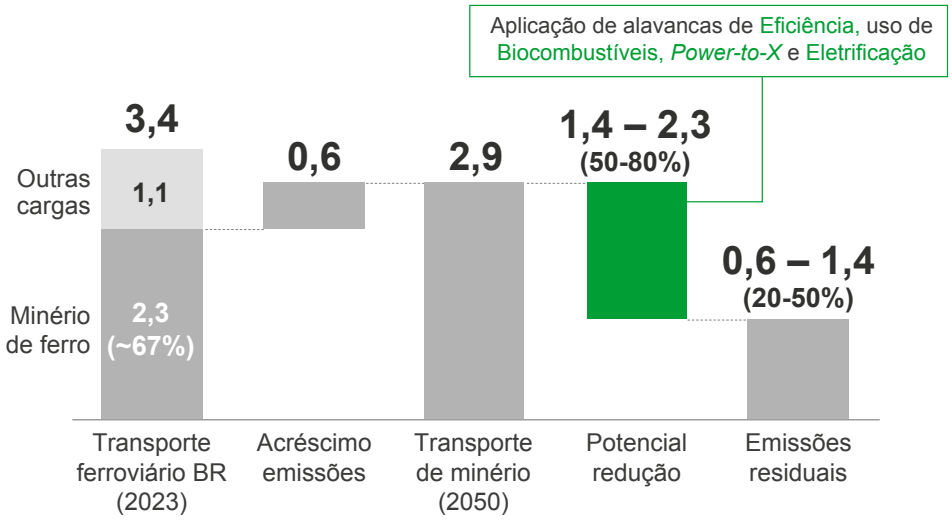


1. Tonelada Quilômetro Útil **2.** Emissões de minério de ferro estimadas a partir de sua participação em TKU (67%) aplicada às emissões totais do modal em 2023, aproximação que pode superestimar emissões de minério de ferro em relação a cargas menos densas
Fonte: Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários (ANTF); SEEG

As **alavancas de mitigação**, discutidas em detalhe na **Coalizão de Transportes**, incluem ganhos de eficiência, uso de biocombustíveis e eletrificação parcial das linhas. O potencial de redução varia de **50% a 80% até 2050 dependendo do cenário considerado**, levando a emissões residuais entre **0,6 e 1,4 $MtCO_2e$**.

Essa redução tem como principal desafio a viabilidade da eletrificação em trechos longos e de grande volume, que depende de altos investimentos em infraestrutura e de um preço de carbono que torne a mudança competitiva. Ainda assim, há uma contribuição relevante a ser materializada, sobretudo no médio prazo, por meio da substituição do diesel por biocombustíveis.

Figura 28 - Emissões do transporte ferroviário de minério (Mt CO_2)



Fonte: SEEG; ANTF; Coalizão dos Transportes



04

Minerais para a transição energética: expansão da produção e contribuição para a descarbonização global

O Brasil possui grande potencial para expandir sua produção mineral e, dessa forma, contribuir de maneira significativa para a transição energética global. A crescente demanda por **tecnologias de baixo carbono** – como veículos elétricos, sistemas de armazenamento e fontes de energia renovável – depende de diversos insumos minerais, **muitos dos quais estão disponíveis em abundância no território nacional**. Nesse cenário, a produção brasileira pode posicionar o país como **um dos principais fornecedores globais de minerais necessários para a transição energética**.

O trabalho da Coalizão buscou **quantificar de forma objetiva** o papel do setor mineral brasileiro nesse processo, a partir de três etapas principais:

- **Seleção de minerais para quantificação**: definição de um conjunto de minerais com reservas no Brasil e indispensáveis para tecnologias da transição energética, considerando sua relevância para aplicações como baterias, energias renováveis e redes elétricas.
- **Projeção da produção brasileira**: estimativas de expansão da produção nacional desses minerais até 2050, alinhadas às tendências globais de crescimento.
- **Avaliação do impacto em emissões**: cálculo do efeito potencial sobre emissões de gases de efeito estufa no Brasil e no mundo, considerando a contribuição desses minerais para a substituição de fontes poluentes de geração de energia.

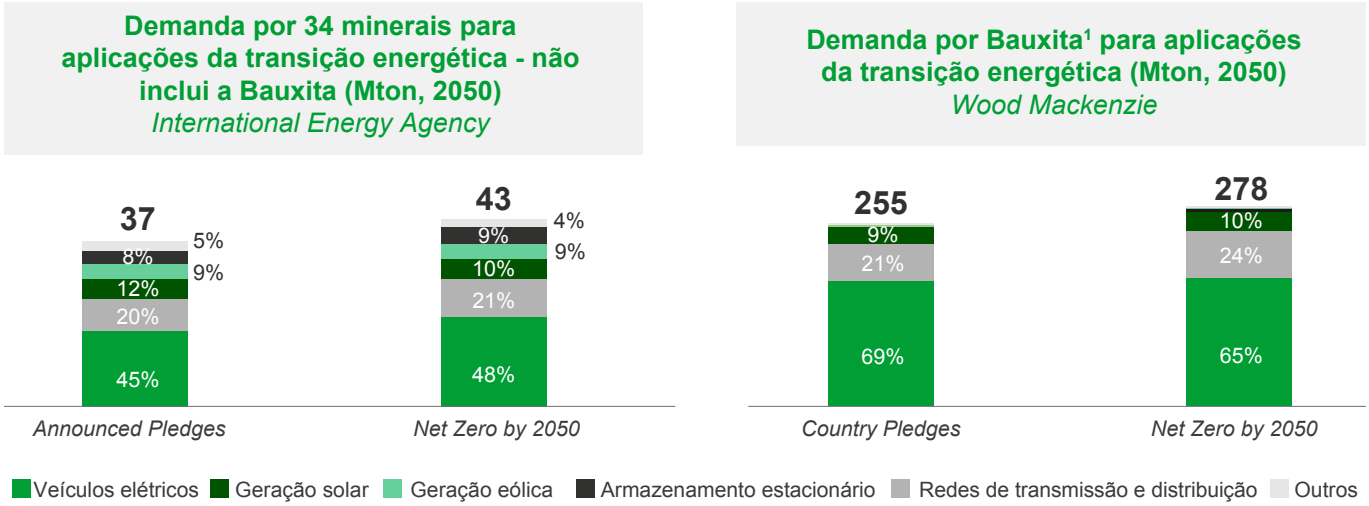
O potencial brasileiro retratado a seguir, que envolve **crescimento acelerado da produção** de minerais e das cadeias de valor associadas, **dependerá de condições sistêmicas favoráveis, incluindo um ambiente regulatório** que, ao mesmo tempo, promova padrões rigorosos de sustentabilidade para licenciamento e operação e permita a expansão ágil de áreas produtivas para atender à crescente demanda e desenvolver o setor mineral brasileiro.

4.1 Expansão da produção de minerais para transição energética

4.1.1 Seleção de minérios para quantificação

Diversos países e organizações internacionais elaboram listas próprias de minerais classificados como **"críticos" ou "estratégicos"**, com base em critérios como **dependência de importações, concentração da oferta global e relevância para setores de alta tecnologia ou defesa, atualizando-as periodicamente, conforme o contexto nacional e internacional**. Nos Estados Unidos, por exemplo, o *U.S. Geological Survey (USGS)* revisa regularmente sua lista de minerais críticos, conforme evoluem as prioridades da indústria e os riscos de fornecimento. De forma semelhante, a União Europeia publica sua lista de *Critical Raw Materials* a cada três anos, ajustando a classificação de acordo com tendências de demanda, novas aplicações tecnológicas e vulnerabilidades da cadeia global. Essas classificações costumam orientar políticas públicas, incentivos à pesquisa, estratégias de diversificação de fornecedores e mecanismos de segurança nacional.

Figura 29 - Cenários de demanda por minerais para aplicações da transição energética



1. Assumindo 5 toneladas de bauxita necessárias para produzir 1 tonelada de alumínio **Nota:** *Stated Policies Scenario* não foi incluído no estudo, dado que não considera compromissos climáticos já firmados por países e empresas. **Fontes:** *IEA Global Critical Minerals Outlook Data Explorer* (2024), *Wood Mackenzie - Aluminium at a crossroads: synchronising supply growth with decarbonisation* (2025)

Este estudo, no entanto, não tem como objetivo definir quais minerais deveriam ser considerados como críticos ou estratégicos para o Brasil ou para o mundo, já que essa discussão envolve múltiplos fatores de política pública e segurança econômica que estão fora do escopo. O foco deste trabalho reside **em identificar minerais em que o Brasil apresenta potencial de produção relevante e que devem registrar crescimento acelerado de demanda em função da transição energética.**

Dessa forma, foram consideradas **cinco aplicações principais da transição energética: veículos elétricos, redes de transmissão e distribuição, geração eólica, geração solar e armazenamento estacionário** – que, segundo a Agência Internacional de Energia (*IEA*), devem concentrar mais de 90% da demanda global por minerais até 2050. A bauxita, embora não esteja incluída nas projeções da *IEA*, também foi considerada, dado o papel fundamental do alumínio em várias dessas aplicações (em especial, para chassis de veículos elétricos, infraestrutura de transmissão e distribuição de energia e molduras de painéis solares).

Figura 30 - Funil de seleção dos minerais para quantificação



A seleção dos minerais considerados para quantificação do impacto em emissões partiu de uma **lista consolidada de 70 minerais**, elaborada a partir de diferentes fontes, tanto nacionais (IBRAM e Governo Federal) quanto internacionais (*USGS*, *IEA* e União Europeia). Sobre essa base, **dois critérios de seleção** foram aplicados. O primeiro consistiu em avaliar se o Brasil dispõe de **reservas significativas e economicamente viáveis** para produção em escala (de acordo com o *USGS* e Estudos para o PNM 2050). O segundo buscou identificar se o mineral é **indispensável e relevante em volume para a fabricação de tecnologias associadas à transição energética** – em linha com o raciocínio anteriormente desenvolvido, que destacou cinco aplicações principais (veículos elétricos, redes de transmissão e distribuição, geração solar, geração eólica e armazenamento estacionário).

Como resultado da aplicação desses filtros, 35 minerais foram excluídos por não atenderem ao primeiro critério, e outros 22 por não atenderem ao segundo, resultando em um conjunto de **13 minerais selecionados para análise: bauxita, manganês, cobre, zinco, silício, nióbio, níquel, grafite, vanádio, lítio, tântalo, terras raras e cobalto**.

Figura 31 - Projeção de demanda global por minerais para aplicações[1] da transição

Minério	Produção brasileira 2023	Produção total e para transição energética (kt)	*Share* brasileiro da produção global	Principais aplicações em transição energética	*CAGR* 2024-50 demanda total[2]	*CAGR* 2024-50 demanda para transição energética[2]	Multiplicador da demanda para transição energética[2] 2050 vs. 2024
Bauxita	34.530	**438.000** *123.000*	7%		1%	3%	2,2x
Manganês	580	**19.600** *186*	3%		1%	14%	29x
Cobre[3]	358	**22.600** *7.737*	1%		2%	4%	2,5x
Zinco[3]	210	**12.100** *764*	2%		1%	4%	2,4x
Silício	196	**4.280** *1.499*	5%		2%	2%	1,8x
Nióbio	102	**110** *0,3*	93%		1%	7%	5x
Níquel	83	**3.750** *562*	2%		3%	8%	8x
Grafite	66	**1.530** *1.505*	4%		5%	7%	6x
Vanádio	5	**104** -	5%		9%	N/A[4]	N/A[4]
Lítio	5	**204** *128*	3%		9%	10%	13x
Tântalo	0,1	**2** *0,1*	7%		3%	2%	1,7x
Terras Raras[5]	0,04	**75** *19*	<1%		3%	6%	4x
Cobalto[6]	0,03	**238** 71	<1%		3%	6%	4x

Veículos elétricos · Geração eólica · Geração solar · Armazenamento estacionário · Rede elétrica

1. Veículos elétricos, geração eólica, geração solar, armazenamento estacionário e rede elétrica **2.** Segundo a *IEA* ou *Wood Mackenzie* (no caso da bauxita), no cenário *Net Zero by 2050* **3.** Dados de 2022 dos estudos para o PNM 2050 (não divulgados pelo *USGS*) **4.** Demanda atual para transição energética é nula **5.** Produção atual divulgada pela Mineração Serra Verde **6.** Produção atual divulgada pela Atlantic Nickel. **Fontes:** *IEA*, IBRAM, *United States Geological Survey (USGS)*, *European Comission*, *Wood Mackenzie*, Estudos para o PNM 2050, Governo Brasileiro

A Figura 31 apresenta os treze minerais selecionados, com informações sobre a produção brasileira, a relevância da produção do país na demanda global e suas principais aplicações em tecnologias da transição energética. Também estão indicadas as taxas de crescimento anual composto (*CAGR*) da demanda até 2050. Nota-se que **para os minerais selecionados o crescimento é impulsionado pela transição energética,** o que fica evidente na comparação das taxas de crescimento total e associado à transição energética.

Além dos minerais selecionados, **destaca-se a importância do minério de ferro para as soluções de transição energética.** O aço é insumo essencial em volumes significativos para turbinas eólicas, usinas solares e redes de transmissão. Dado seu volume, relevância para diversas outras aplicações e a discussão no capítulo anterior sobre a descarbonização da cadeia, optou-se por não o incluir na quantificação.

Figura 32 - Projeções de produção brasileira dos minerais para a transição

Minério	Produção e *share* global brasileiro 2023 (kt)		Crescimento anual da demanda (*CAGR*) 2023-2050					Produção brasileira 2050 (kt)			
			Global no cenário APS	Global no cenário NZS	Transição energética no cenário NZS	PNM	*Range* adotado	Produção e *share* global brasileiro 2050 (kt)		Percentual e produção (kt) destinada à transição energética[1]	
Bauxita[2,3]	34.530	8%	0,7%	0,9%	2,5%	1,6%	**0,7 – 2,5%**	41.600 – 69.900	9-15%	58%	**24.280 – 40.820**
Manganês	580	3%	0,8%	0,9%	14%	4,0%	**0,8 – 4,0%**[4]	714 – 1.672	3-7%	22%	**157 – 368**
Cobre[3]	358	1%	1,5%	1,7%	4%	4,4%	**1,5 – 4,4%**	545 – 1.195	1-3%	48%	**256 – 499**
Zinco[3]	210	2%	1,1%	1,1%	3%	5,0%	**1,1 – 5,0%**	284 – 820	2-5%	11%	**33 – 94**
Silício	196	5%	2,1%	2,2%	2,4%	N/A[5]	**2,1 – 2,4%**	343 – 369	~5%	37%	**127 – 137**
Nióbio	102	93%	1,3%	1,3%	7%	3,7%	**1,3%**[6]	~144	~94%	1%	**~1,5**
Níquel	83	2%	3,0%	3,2%	8,3%	5%	**3,0 – 8,3%**	183 – 717	2-9%	59%	**108 – 424**
Grafite	66	4%	3,5%	5,0%	7%	5%	**3,5 – 7,0%**	166 – 389	3-8%	49%	**121 – 192**
Vanádio	5	5%	8,5%	9,1%	N/A[7]	2,5%	**2,5 – 9,1%**	11 – 57	1-6%	83%	**9 – 48**
Lítio	5	3%	8,1%	8,8%	10%	7,5%	**4,9 – 10,4%**	19 – 76	1-4%	92%	**19 – 70**
Tântalo	0,1	7%	3,0%	3,0%	2,1%	N/A[8]	**2,1 – 3,0%**	0,24 – 0,34	6-8%	4%	**~0,01**
Terras Raras	0,04	<1%	-	-	1,2%[9]	0%[10]	N/A[11]	1,4 – 1,8	~1%	36%	**0,6 – 0,7**
Cobalto	0,03	<1%	-	-	0,4%[12]	2,4%[13]	N/A[14]	5,0 – 9,5	1-2%	58%	**2,9 – 5,5**
Total	**36 Mt**	**7%**						**44 ~ 75 Mt**	**8-13%**		**25 ~ 43 Mt**

Nota: *APS = Announced Pledges Scenario; NZS = Net Zero by 2050 Scenario* **1.** Com base nos dados estimados para 2050 pela *IEA* para produção destinada para transição energética **2.** Considerando apenas demanda para alumínio primário **3.** Produção atual segundo a Associação Brasileira do Alumínio (ABAL) **4.** Percentual destinado à transição hoje é muito pequeno (1%), logo, uso do *CAGR* da transição gera resultado inconsistente (produção brasileira igual a 80% da produção mundial em 2050) **5.** PNM 2050 não apresenta projeções para produção de silício **6.** Percentual destinado à transição hoje é muito pequeno (0,3%), logo, uso do *CAGR* de transição gera resultado inconsistente (produção brasileira maior que a mundial em 2050, assim como o uso do *CAGR* do PNM) **7.** Demanda atual para transição energética é nula **8.** PNM parte de produção de 380 kton de minério de tântalo em 2022 (equivalente a ~100 kton de tântalo metálico, a depender do teor de Ta_2O_5), muito distante da ordem de grandeza divulgada pelo *USGS* e pelos atuais *players* **9.** *CAGR* 2030-2050 (projeções dos projetos previstos disponíveis até 2030) **10.** Segundo PNM, valor da produção anual de terras raras é constante de 2025 a 2050 (12kt) **11.** Foram utilizadas projeções de projetos previstos para calcular o ponto de partida, com aplicação de *CAGR*s estimados a partir de 2030 **12.** Foram utilizadas projeções de projetos previstos para calcular o ponto de partida, com aplicação de *CAGR*s estimados a partir de 2035 **13.** *CAGR* 2030-2050 (início da produção em 2030) **14.** *CAGR* 2035-2050 (projeções dos projetos previstos disponíveis até 2035) **Fontes**: *USGS*, *IEA*, *Wood Mackenzie*, Estudos para o PNM 2050

4.1.2 Projeções de crescimento da produção brasileira

A evolução da produção mineral brasileira até 2050 dependerá de múltiplos fatores, que combinam condições nacionais e internacionais. Entre eles, destacam-se a disponibilidade de investimentos, o grau de certeza em relação à demanda futura, a dinâmica dos mercados globais de *commodities* e o desenvolvimento de novas tecnologias, que podem inclusive introduzir substitutos ainda não previstos para determinados insumos. Esse conjunto de variáveis gera incertezas relevantes sobre o ritmo de expansão da produção. Dessa forma, **na tentativa de harmonizar diferentes visões e refletir a diversidade de cenários possíveis, optou-se por adotar intervalos de crescimento amplos** nas projeções dos 13 minérios selecionados.

As estimativas de crescimento da produção brasileira foram definidas com base nas **projeções de demanda global** publicadas pela *International Energy Agency (IEA)* e pela *Wood Mackenzie*, complementadas pelas projeções dos **Estudos para o PNM 2050**. Além disso, para minerais específicos, as estimativas foram ajustadas considerando **expansões de capacidade já anunciadas e projetos relevantes divulgados** pelos principais *players* do setor.

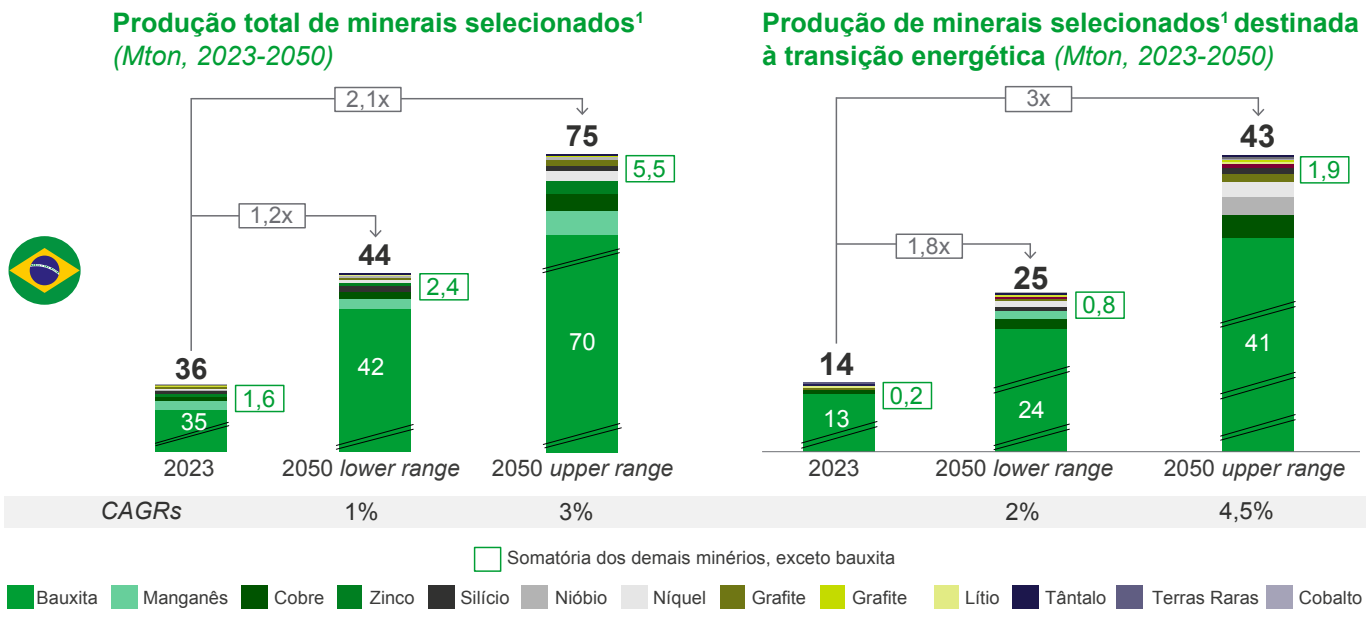
A projeção de crescimento da produção brasileira até 2050 foi construída a partir de **intervalos de taxa de crescimento anual** que combinam três referências: as projeções globais de demanda total, as projeções específicas para a transição energética e as projeções nacionais do PNM 2050. O cenário mais conservador (*lower range*) adota, para cada mineral, o menor *CAGR* observado, enquanto o cenário mais otimista (*upper range*) utiliza o maior. Assim, **o intervalo busca capturar a amplitude de visões disponíveis e refletir as incertezas associadas ao futuro da demanda e da oferta**.

De modo geral, observa-se que **o Brasil tende a manter sua participação relativa no mercado global nos cenários mais conservadores e ampliar esse share nos cenários mais otimistas** – conforme ilustrado pelos indicadores de participação ao lado dos valores de produção estimados.

Como resultado, a produção brasileira de minerais selecionados pode evoluir dos atuais 36 Mt (1,6Mt, excluindo a bauxita) para um intervalo **entre 44 e 75 Mt** em 2050 (2,4 e 5,5 Mt, excluindo a bauxita). O percentual da produção destinado especificamente à transição energética segue as estimativas da *International Energy Agency (IEA)*. Dessa forma, cerca de **25 a 43 Mt seriam direcionados a aplicações associadas à transição energética** (0,8 a 1,9 Mt, excluindo a bauxita), reforçando o papel estratégico do Brasil como fornecedor global de insumos críticos para tecnologias de baixo carbono.

Na visão consolidada das diferentes projeções, observa-se que a produção total dos minerais selecionados deve alcançar **entre 1,2 e 2,1 vezes os níveis atuais** até 2050. O crescimento é mais expressivo no caso da produção destinada à **transição energética**, variando de **1,8 a 3,0 vezes** no mesmo período. Esse resultado evidencia que a parcela voltada à transição tende a ganhar importância relativa ao longo do tempo, consolidando-se como um relevante motor de expansão da produção mineral brasileira.

Figura 33 - Produção brasileira de Minerais para Transição – 2023 e 2050



1. 13 minérios selecionados para o estudo **2.** Com base nos dados estimados para 2050 pela *IEA* para produção destinada para transição energética. **Fontes:** *USGS*, *IEA*

BNDES, Finep e Vale: mais de R$ 45 bilhões mobilizados para minerais estratégicos no Brasil

O Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) tem direcionado esforços para **fortalecer a cadeia de minerais considerados estratégicos para a transição energética, a descarbonização e a produção sustentável de alimentos.**

Em junho de 2025, em parceria com a Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), o Banco aprovou **56 planos de negócio** na chamada pública destinada à transformação de minerais estratégicos, totalizando R$ 45,8 bilhões para a próxima fase de implantação – o **Plano de Suporte Conjunto (PSC).** Os projetos englobam uma variedade de minerais fundamentais para tecnologias limpas, com destaque para **terras raras (10 projetos), lítio (8), grafite (6), cobre (4) e silício (4).** Os planos aprovados avançarão para a fase de estruturação do PSC, em que serão indicados instrumentos financeiros (como linhas de crédito, subvenções e recursos não reembolsáveis) para viabilizar os projetos.

Também em 2025, em parceria com a Vale, o banco lançou o FIP Minerais Estratégicos com a meta de mobilizar mais de R$ 1 bilhão. Os recursos serão destinados a empresas juniores e de médio porte que atuem em pesquisa mineral, desenvolvimento e implantação de novas minas, com expectativa de apoiar entre 15 e 20 projetos no Brasil.

Iniciativas como essas representam um passo relevante do setor, junto ao governo, para garantir a oferta de minerais estratégicos em bases competitivas e sustentáveis, promovendo inovação, ampliando a segurança de suprimento e fortalecendo a posição do Brasil nas cadeias globais de valor associadas à transição energética e à agricultura de baixo carbono. Estes mecanismos, aliados aos demais habilitadores, podem ajudar o setor a responder à demanda crescente e alcançar as expectativas ambiciosas de dobrar sua produção até 2050.

4.2 Impacto em emissões

4.2.1 Impacto em emissões globais em 2050

A estimativa da contribuição da mineração brasileira para a transição energética global considerou as projeções de produção acumulada entre 2025 e 2050 para aplicações da transição energética, discutida na seção anterior, e sua participação global nas principais aplicações – especificamente, veículos elétricos, painéis solares e turbinas eólicas, além de outras estruturas essenciais, como redes de transmissão, sistemas de armazenamento estacionário e chassis de veículos. A Coalizão então estimou o impacto de mitigação de emissões que essas aplicações, em sua etapa de uso, evitariam através da substituição de tecnologias emissoras. Destaca-se que essa abordagem focada na etapa de uso das aplicações da transição energética tem limitações e poderia ser complementada pela análise de emissões ao longo da cadeia de valor, que não foi contemplada nesse estudo.

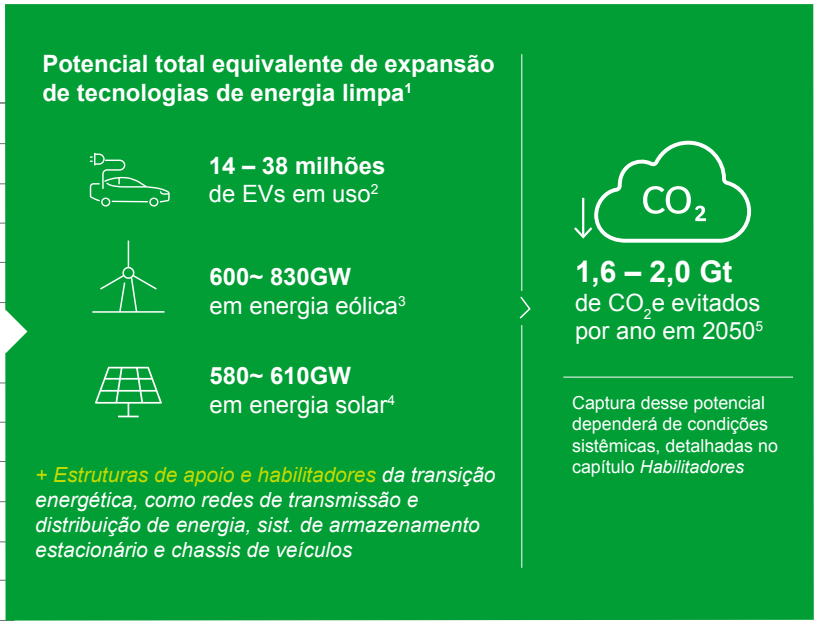
A análise indica que, com a expansão da produção de minerais para a transição, o Brasil seria capaz de fornecer minerais suficientes para viabilizar a produção de **14 a 38 milhões de veículos elétricos, cerca de 600 a 830 GW de capacidade instalada de geração de energia eólica** e aproximadamente **580 a 610 GW de capacidade instalada de geração de energia solar,** além de outras infraestruturas essenciais para a transição energética.

Essas tecnologias, através da substituição de fontes poluentes – isto é, eliminação de veículos movidos a gasolina e de eletricidade gerada por combustíveis fósseis – podem viabilizar a mitigação de gases de efeito estufa estimada **entre 1,6 e 2,0 bilhões de toneladas de CO_2e em 2050 globalmente** – grandeza comparável às emissões brutas totais brasileiras em 2023, de aproximadamente 2,3 bilhões de toneladas de CO_2e.

A concretização deste potencial **depende diretamente do fortalecimento dos habilitadores críticos** – tecnologia e P&D, infraestrutura, financiamento, prêmio verde e cadeia de valor, além do cenário regulatório-econômico. Esses elementos são **indispensáveis para assegurar que a produção mineral brasileira se converta, de maneira efetiva, em insumos para a transição energética.**

Figura 34 - Produção brasileira pode viabilizar redução de 1,6 - 2,0 $GtCO_2e$

Minérios selecionados para quantificação	Produção brasileira para a transição energética 2050 (kt)
Bauxita	24.280 – 40.820
Manganês	157 – 368
Cobre	256 – 499
Zinco	33– 94
Silício	127 – 161
Nióbio	~1,5
Níquel	108 – 424
Grafite	121 – 192
Vanádio	9 – 48
Lítio	19 – 70
Tântalo	~0,01
Terras Raras	0,6 – 0,7
Cobalto	2,9 – 5,5



Energia eólica | Energia solar fotovoltaica | Veículos elétricos | Armazenamento estacionário | Rede elétrica

1. Considerando que minerais brasileiros são usados na produção das tecnologias seguindo o share de produção brasileiro, para cada tecnologia, do mineral do qual o Brasil possui maior share: bauxita para energia eólica, silício para energia solar e níquel para baterias de veículos elétricos (leves e pesados). **2.** De 2 a 6% (*share* da demanda de níquel) de uma frota total de 2 bilhões de veículos elétricos em 2050 (estimada pela *IEA* no cenário *Net Zero*). **3.** De 9 a 12% (*share* da demanda de bauxita) da expansão de 7 TW de capacidade instalada até 2050 **4.** Aproximadamente 5% (*share* da demanda de silício) da expansão de 12,7 TW de capacidade instalada até 2050 **5.** Considerando substituição direta de fontes fósseis: 1,8 toneladas CO_2e anuais pada cada *ICEV* substituído; 480 tCO_2e por GWh de energia gerada (média das fontes fósseis ponderada pela capacidade instalada)
Fontes: *IEA*, *Climate Trace*, *USGS*, Estudos para o PNM 2050

4.2.2 Impacto nas emissões brasileiras em 2035 e 2050

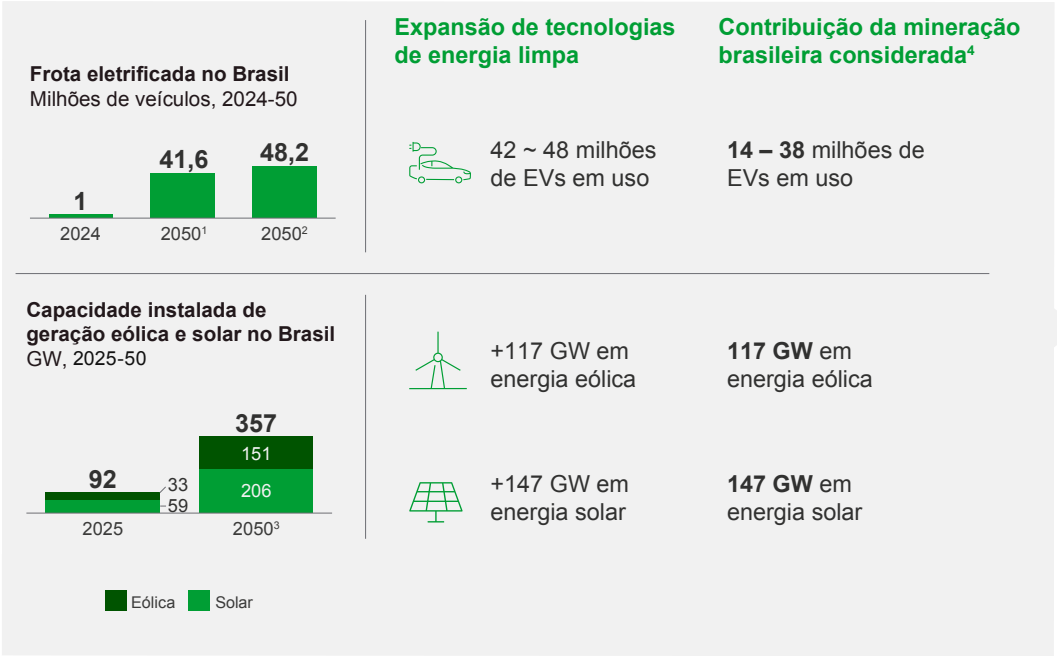
Como os insumos minerais brasileiros alimentarão cadeias de produção globais, é esperado que a mineração contribua indiretamente para a descarbonização da economia brasileira através das mesmas aplicações, que substituirão tecnologias de emissão fóssil em território brasileiro.

Comparando o potencial global estimado com a projeção de demanda por essas aplicações no Brasil, **a contribuição mineral brasileira poderia evitar entre 260 e 300 milhões de toneladas de CO_2e por ano em 2050.** Esse valor é comparável às emissões de 2023 dos estados de São Paulo e Minas Gerais combinadas.

Reproduzindo a análise para 2035, observa-se um potencial de redução a partir das tecnologias produzidas com minerais brasileiros de **60 a 75 milhões de toneladas de CO_2e por ano em 2035**, valor comparável às emissões de 2023 do estado do Rio de Janeiro.

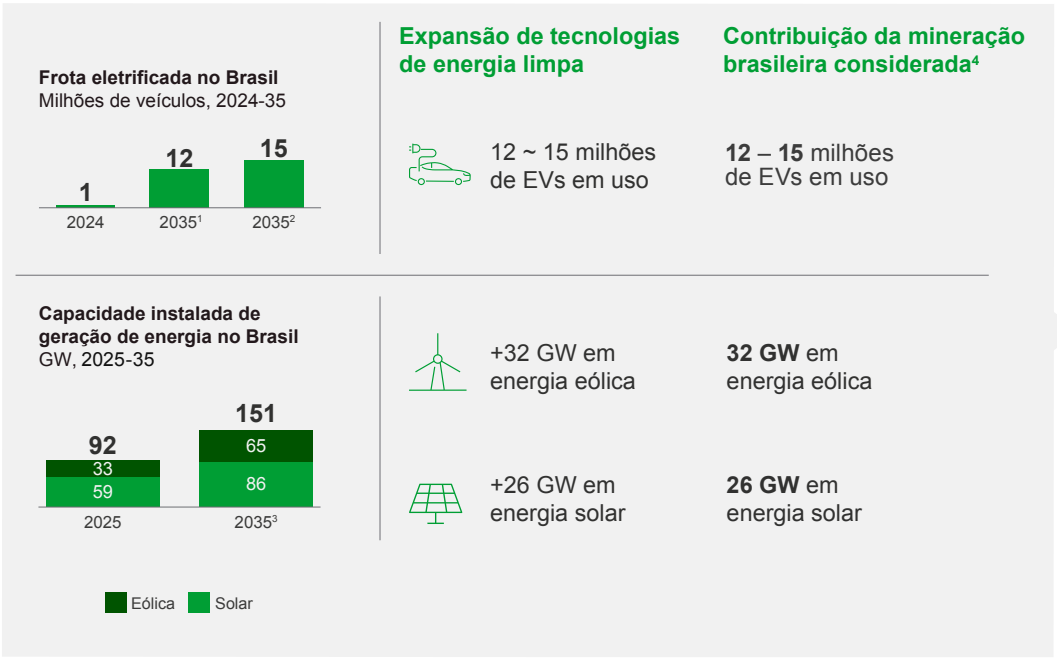
A estimativa de impacto indireto nas emissões brasileiras levou em conta projeções de crescimento das aplicações de transição (veículos elétricos, painéis solares, turbinas eólicas) no Brasil. No caso da geração elétrica, foram usados os cenários definidos pela Coalizão de Energia. Para veículos elétricos, foram utilizados os valores definidos pela Coalizão de Transportes, que projetou a eletrificação progressiva da frota veicular no Brasil em diferentes cenários.

Figura 35 - No Brasil, contribuição pode chegar a 260 – 300 $MtCO_2e$ em 2050



1. Cenário de crescimento gradual da adoção de novas tecnologias de motorização **2.** Cenário de rápida convergência em direção a eletrificação da frota, com *BEVs* assumindo dominância nas vendas **3.** Projeção da matriz elétrica Brasileira construída pela Coalizão Energia **4.** Com base na projeção de expansão da matriz energética brasileira, limitada ao potencial de produção da mineração para transição **5.** Considerando substituição direta de fontes fósseis: 1,8 tCO_2e anuais pada cada ICEV (Veículo com Motor de Combustão Interna) substituído; 480 tCO_2e por GWh de energia gerada (média das fontes fósseis ponderada pela capacidade instalada).
Fontes: Coalizão Transportes (Modal Rodoviário), Coalizão Energia

Figura 36 - Transição fomentada pela mineração pode reduzir emissões brasileiras em 60 – 75 $MtCO_2e$ em 2035



1. Cenário de crescimento gradual da adoção de novas tecnologias de motorização **2.** Cenário de rápida convergência em direção a eletrificação da frota, com BEVs assumindo dominância nas vendas **3.** Projeção da matriz elétrica Brasileira construída pela Coalizão Energia **4.** Com base na projeção de expansão da matriz energética brasileira, limitada ao potencial de produção da mineração para transição energética **5.** Considerando substituição direta de fontes fósseis: 1,8 tCO_2e anuais pada cada cada ICEV (Veículo com Motor de Combustão Interna) substituído; 480 tCO_2e por GWh de energia gerada (média das fontes fósseis ponderada pela capacidade instalada)
Fontes: Coalizão Transportes (Modal Rodoviário), Coalizão Energia



05

Habilitadores para a descarbonização do setor mineral e expansão de minerais para a transição energética

A materialização das contribuições da mineração discutidas neste documento dependerá de habilitadores sistêmicos, que deverão ser desenvolvidos e aperfeiçoados em colaboração com múltiplos *stakeholders*. Neste capítulo, os habilitadores são detalhados, incluindo a articulação de sua importância na trajetória brasileira de descarbonização e exemplos de iniciativas concretas que podem contribuir para fortalecer essas condições.

Os habilitadores estão organizados em cinco grupos: avanços em **tecnologia e P&D**, garantindo maturidade técnica e viabilidade de soluções de baixo carbono; **infraestrutura** de logística, energia e armazenagem com capilaridade para sustentar operações atuais e novos projetos; mecanismos de **financiamento** verde e taxonomias sustentáveis capazes de reduzir riscos e ampliar o acesso a capital em escala; a consolidação de um ecossistema de cadeia de valor, baseado em prêmio verde e rastreabilidade, que assegure previsibilidade de demanda por minerais de baixo carbono e alinhe incentivos ao longo da cadeia produtiva; e, por fim, um **ambiente regulatório-econômico** estável, com incentivos alinhados e precificação de carbono que orientem investimentos no setor.

Na discussão de habilitadores regulatório-econômicos, o **preço do carbono** se destaca como um habilitador essencial para a trajetória de descarbonização. Ao atribuir um valor econômico às emissões, cria-se um sinal de mercado que **orienta investimentos e aumenta a competitividade de soluções de baixo carbono** no setor mineral. Neste estudo, foram adotadas como referência as projeções da *International Energy Agency (IEA)* nos cenários *Announced Pledges Scenario (APS)* e *Net Zero by 2050 (NZE)*, que indicam **níveis de precificação capazes de impulsionar de forma decisiva os aportes em tecnologias e práticas sustentáveis**.

Figura 37 - Contribuições da mineração dependerão de contexto favorável à descarbonização – cenário de habilitadores até 2050:



1. Intervalos de preço definidos pelos cenários *IEA Announced Pledges* e *Net Zero by 2050* para a categoria *"Emerging markets and developing economies with net zero emissions pledges" - Global Energy and Climate Model Documentation 2024 (IEA)*

5.1 Tecnologia e P&D

Os habilitadores relacionados a Tecnologia e P&D reúnem um conjunto de condições estruturais fundamentais com foco em inovação, eficiência e competitividade em baixo carbono. Isso inclui a criação de incentivos estruturais voltados ao **desenvolvimento de soluções aplicadas** como eletrificação de frotas pesadas, uso de biodiesel avançado, hidrogênio de baixo carbono e processos de transformação e transporte de minério, capazes de reduzir substancialmente a pegada de carbono do setor.

Adicionalmente, é essencial o investimento em **mapeamento geológico de alta resolução** com acesso público, um ativo estratégico que orienta decisões de investimento, ajuda a reduzir incertezas exploratórias e fortalece a base de conhecimentos do setor mineral. No Brasil, programas como o PlanGeo do Serviço Geológico do Brasil — que busca mapear sistematicamente áreas com potencial mineral — exemplificam essa necessidade.

Por fim, o ambiente de P&D deve contemplar também o desenvolvimento **de tecnologias e expertise aplicados ao beneficiamento de minerais** – especialmente aqueles ligados à transição energética, cuja demanda cresce de forma acelerada e cujo valor agregado aumenta significativamente nessa etapa da cadeia. Investir nesse campo pode estimular o surgimento de uma indústria nacional mais sofisticada e reduzir a concentração atual de cadeias globais de valor, hoje dominadas por poucos países, como a China.

5.1.1 Hidrogênio e redução de custos

Neste estudo, foram propostas alavancas para a descarbonização do setor mineral que passam pela adoção do hidrogênio como insumo energético. No transporte e em processos industriais de difícil abatimento, o hidrogênio aparece como alternativa estratégica para substituir combustíveis de alta intensidade de carbono. Sua utilização pode representar uma transformação estrutural, abrindo caminho para soluções de baixo ou até zero carbono em cadeias historicamente dependentes de carvão e óleo combustível.

Apesar de seu potencial, **a difusão do hidrogênio enfrenta barreiras relevantes**. A principal delas diz respeito aos **custos de produção**, ainda extremamente elevados em comparação a combustíveis fósseis convencionais, de forma a inviabilizar uma ampla adoção no setor mineral. Além disso, o desenvolvimento tecnológico dos eletrolisadores, a escala de produção e a disponibilidade de energia renovável confiável em grande volume são condicionantes que determinam sua competitividade. Outro ponto crítico é a **infraestrutura logística necessária** — desde o armazenamento seguro até a distribuição —, que ainda se encontra em estágio inicial em praticamente todos os mercados globais.

Nesse contexto, a **pesquisa e desenvolvimento** ganham importância estratégica. Avanços tecnológicos têm potencial para reduzir custos, aumentar a eficiência dos processos de eletrólise e desenvolver rotas alternativas, como o uso de amônia ou metanol verdes como vetores energéticos. Da mesma forma, a **coordenação entre políticas públicas, instrumentos de incentivo e investimentos privados será decisiva** para viabilizar projetos de hidrogênio em escala industrial. Para o Brasil, que dispõe de abundantes recursos renováveis, o desafio está em transformar essa vantagem natural em liderança tecnológica e competitiva, garantindo que o hidrogênio se torne um vetor realista e economicamente viável da descarbonização do setor mineral.

Figura 38 – Exemplos recentes - Habilitadores de Tecnologia e P&D

Exemplos selecionados: programas de P&D aplicada à descarbonização
EIT *Raw Materials* – consórcio com *funding* público e coinvestimento privado (UE - União Europeia) *A EIT já mobilizou **+€3,6 bi para projetos de P&D aplicada,** articulando empresas, universidades e centros tecnológicos em projetos inovadores como o ReLieVe, um piloto para **reciclar baterias de lítio**, em parceria com BASF, Eramet e Suez*
Miner – programa com financiamento público (Departamento de Energia - EUA) *Com foco em projetos de P&D inovadores e de alto risco tecnológico, o programa já destinou **US$ 39 mi a projetos de pesquisa** conduzidos por universidades e* startups*, como o da Universidade do Texas, focado em **extração eletroquímica de níquel e lítio***
Exemplos selecionados: desenvolvimento de tecnologias para descarbonização
BeVant da Be8, Biodiesel pode ser usado 100% puro em motores a diesel (RS) *Desenvolvido pela Be8, o BeVant pode ser usado puro diretamente em motores a diesel. Em 2025, foi **adotado no Aeroporto de Congonhas (SP)** em veículos de pista e geradores e está em fase de **testes em frotas da Alcoa em Juriti,** além de operações da Gerdau e da Ambipar*
Genium da Seventeen66, tecnologia de injeção parcial de H_2 para reduzir consumo de diesel *O sistema de eletrólise da Genium injeta hidrogênio puro sob demanda em motores a diesel para atuar como **aditivo, reduzindo em torno de 10% do consumo de combustível e quase 20% das emissões.** A tecnologia está em fase de testes nas unidades de Juriti e Poços de Caldas da Alcoa*

5.2 Infraestrutura

Infraestrutura é um dos pilares fundamentais para viabilizar a descarbonização da mineração na medida que cria as condições físicas e sistêmicas necessárias para a adoção de novas tecnologias e combustíveis de baixo carbono. A viabilidade de combustíveis alternativos e de tecnologias de baixo carbono está diretamente associada à **existência de redes logísticas e elétricas adequadas, sobretudo em regiões mineradoras remotas**. Sem infraestrutura suficiente, tanto a adoção de soluções de eletrificação e combustíveis limpos quanto a própria expansão da produção de minerais essenciais enfrentam barreiras significativas de custo, confiabilidade e escala.

O tema envolve múltiplas dimensões que se complementam: **produção, distribuição e armazenagem de biocombustíveis** são essenciais para garantir o abastecimento de alternativas ao diesel, como etanol e biodiesel, ampliando a competitividade do setor; a **expansão da rede de transmissão e distribuição de energia elétrica** é condição fundamental para viabilizar a eletrificação de equipamentos pesados, assegurar a continuidade operacional e integrar fontes renováveis dispersas ao sistema nacional; por fim, a **infraestrutura para escoamento da produção mineral** é determinante para reduzir custos logísticos e alinhar os modais de transporte às metas de baixo carbono, garantindo que o crescimento projetado da produção mineral se materialize de forma sustentável e competitiva.

5.2.1 Produção, distribuição e armazenagem de biocombustíveis

O Brasil possui uma base consolidada de produção de biocombustíveis, com destaque para etanol e biodiesel, que juntos ultrapassaram 40 bilhões de litros em 2023. O desempenho recente reflete tanto a competitividade do país em etanol de cana e biodiesel quanto a continuidade de investimentos em capacidade produtiva. A **infraestrutura de distribuição** também se mostra relativamente estruturada, com rede de terminais, centros de mistura e transporte multimodal que dão suporte ao abastecimento interno. **Programas como o RenovaBio** têm contribuído para consolidar regras e incentivar investimentos, criando maior previsibilidade ao setor.

Ainda assim, o setor enfrenta alguns desafios estruturais importantes. Um deles é **assegurar que a expansão da produção ocorra de forma sustentável**, sem pressionar ecossistemas sensíveis ou competir com áreas destinadas à produção de alimentos, tema que permanece no centro do debate nacional e internacional. Outro ponto é a **logística de escoamento e armazenamento**, ainda sujeita a gargalos regionais, especialmente em áreas remotas, o que pode elevar custos e limitar a competitividade.

Soma-se a isso a **incerteza regulatória e de incentivos**, que afeta a previsibilidade de investimentos, além de dificuldades de financiamento para projetos de maior risco tecnológico ou em estágios iniciais.

5.2.2 Expansão da rede de transmissão e distribuição de energia elétrica para suporte a eletrificação

A expansão da adoção de diversas alavancas de descarbonização relacionadas à eletrificação depende diretamente da **disponibilidade e robustez da infraestrutura elétrica**. Sem uma rede de transmissão e distribuição adequada, especialmente em locais remotos onde ocorrem muitas operações minerárias, torna-se impraticável viabilizar a eletrificação de processos, operar equipamentos elétricos em campo ou integrar fontes renováveis dispersas ao sistema nacional.

Garantir que a energia chegue de forma segura e estável até esses pontos de consumo é, portanto, um dos principais habilitadores da descarbonização no setor. **Investimentos em linhas de distribuição dedicadas, reforço de subestações e melhoria da capilaridade elétrica regional** são fundamentais para permitir a adoção de tecnologias limpas e sustentar a competitividade das operações brasileiras na transição energética.

5.2.3 Infraestrutura para escoamento da produção mineral

O crescimento projetado da produção mineral brasileira exigirá uma infraestrutura de transporte capaz de acompanhar esse movimento. A expansão da oferta só poderá se materializar de forma competitiva se houver sistemas logísticos robustos, eficientes e alinhados às metas de descarbonização.

O Brasil já parte de uma base relativamente favorável, com destaque para a **rede ferroviária** consolidada no escoamento de minério de ferro, com sistemas integrados que conectam minas em Minas Gerais e Pará a portos no Espírito Santo e Maranhão. A ampliação da malha e, sobretudo, sua modernização são passos centrais para reduzir a dependência do diesel e alinhar o modal às exigências de baixo carbono. **Hidrovias e cabotagem** também são alternativas interessantes, especialmente em regiões com vocação natural para transporte fluvial e marítimo, como a Amazônia e o corredor Norte. Investimentos em terminais, dragagem sustentável e integração multimodal podem consolidar esse modal como opção de menor custo e intensidade de carbono em determinados fluxos.

Ao mesmo tempo, persistem fragilidades que limitam a competitividade e a sustentabilidade do setor. As **rodovias seguem com papel importante**, mas são o modal mais intensivo em emissões e permanecem como principal solução em áreas não atendidas por ferrovia ou hidrovia. O desafio será limitar seu uso aos trechos indispensáveis, ao mesmo tempo em que se desenvolve infraestrutura de abastecimento de biocombustíveis e, no futuro, soluções de eletrificação e hidrogênio para transporte pesado.

Nesse conjunto, **minerodutos representam uma alternativa** já estabelecida em cadeias específicas, como minério de ferro em forma de concentrado e bauxita. Exemplos como os sistemas Samarco, Minas-Rio e Paragominas–Alunorte evidenciam que, em determinados contextos, os dutos podem combinar eficiência operacional com menores emissões, ao serem movidos por bombeamento elétrico. É importante destacar, contudo, que a solução requer atenção para disponibilidade hídrica.

Infraestrutura logística: mais de US$ 10 bi para viabilizar expansão até 2029

Segundo estimativas do IBRAM, o setor de mineração brasileiro deve realizar entre 2025 e 2029 cerca de US$ 68,4 bilhões em investimentos. Desse total, cerca de **US$ 10,9 bilhões (16%) serão destinados à infraestrutura logística.**

A estimativa confirma a **centralidade da infraestrutura como habilitador para o crescimento e a descarbonização da mineração,** sinalizando que o setor reconhece a importância de fortalecer sua capacidade logística para sustentar o aumento da produção.

Figura 39 - Exemplos recentes - Habilitadores de Infraestrutura

Exemplos selecionados: *hubs* logísticos	
Pilbara – *hub* logístico maduro *Pilbara integra 3.800 km de ferrovias privadas (BHP, Rio Tinto, FMG)* ***conectando minas remotas a portos*** *como Port Hedland e Dampier; hoje exporta cerca de 800 Mt/ano de minério de ferro e é modelo global consolidado de* hub *mineral*	
Vale do Lítio – *hub* logístico em formação (MG) *Lançado em 2023 pelo governo de MG, o Projeto Vale do Lítio já atraiu* ***R$ 6,3 bi em investimentos*** *junto a empresas como Sigma Lithium e CBL, mobilizando* ***infraestrutura, inovação e qualificação*** *em 17 municípios do Vale do Jequitinhonha*	
Exemplos selecionados: infraestrutura para combustíveis alternativos	
Rio Tinto e HF Sinclair, 100% HVO na mina de Kennecott *Em 2024, a Rio Tinto* ***substituiu todo o diesel fóssil por HVO na frota móvel*** *da mina de Kennecott (Utah), em* ***parceria com a produtora HF Sinclair.*** *Com* ***2 tanques de 18mil barris instalados in loco*** *para abastecimento contínuo, o complexo de mineração tornou-se um dos primeiros do mundo a operar apenas com diesel renovável em equipamentos pesados*	
Genium da Seventeen66, tecnologia de injeção parcial de H_2 para reduzir consumo de diesel *Em 2025, Anglo American iniciou* ***projeto piloto com a petroquímica Sasol*** *para produzir* ***biodiesel a partir de moringa*** *cultivada em áreas previamente mineradas em processo de reabilitação. Em um contexto de produção nacional incipiente e demanda crescente, a iniciativa busca viabilizar* ***fornecimento local e logística de abastecimento curta e eficiente***	
Exemplos selecionados: infraestrutura para combustíveis alternativos	
Ternium e Gás Verde – Biometano de aterro em planta térmica (RJ) *Desde 2019, a siderúrgica Ternium utiliza* ***biometano purificado do aterro de Seropédica*** *(RJ) e fornecido pela Gás Verde, em* ***substituição parcial ao gás natural*** *em processos térmicos, com* ***fornecimento contínuo*** *de biocombustível e operação estável sem adaptação industrial*	
Vallourec – Pioneira em pelotização com 100% carvão vegetal (MG) *Desde 2018, a siderúrgica Vallourec opera uma* ***planta de pelotização com 100% carvão vegetal.*** *Ela foi viabilizada por três pilares principais:* ***florestas próprias de eucalipto*** *com carbonização integrada;* ***adequações tecnológicas no forno*** **grate-kiln** *(moagem, injeção, controle térmico); e apoio institucional e técnico do* ***Projeto Siderurgia Sustentável*** *(PNUD/MMA)*	
Vale, Petrobras, Oldendorff Carriers e Porto de Singapura – Navio com B24 *Em 2023, a Vale realizou seu primeiro* **shipping** ***transoceânico com B24,*** *articulando uma parceria entre Petrobras (fornecedora do biocombustível), Oldendorff Carriers (armador com* ***navio compatível****) e o porto de* ***Singapura*** *(um dos três maiores* hubs *globais com* ***infraestrutura de*** **bunkering** ***para múltiplos combustíveis renováveis***	

5.3 Financiamento

Dada a natureza intensiva em capital dos projetos de mineração – com curvas de retorno longas e incertezas em fases como exploração e viabilidade – torna-se essencial adotar **estruturas de financiamento que considerem as especificidades do setor**. Financiar projetos sem histórico operacional ou reservas comprovadas representa alto risco para investidores convencionais, o que costuma resultar em alto custo de capital ou até dificuldade de acesso a crédito.

O **financiamento público** pode exercer um papel central na viabilização de projetos minerais voltados à transição energética, sobretudo ao reduzir as barreiras de acesso ao crédito. Linhas de financiamento dedicadas ou aportes via bancos de desenvolvimento oferecem recursos de longo prazo em condições mais adequadas ao perfil do setor. Esses instrumentos podem ser aplicados tanto de forma direta quanto por meio de **estruturas de *blended finance***, em que o capital público funciona como âncora para atrair investidores privados, reequilibrando a relação risco-retorno e ampliando a disponibilidade de *funding* de mercado.

Além disso, **mecanismos de garantias, mitigação de risco e fundos de colaterais** são instrumentos relevantes para destravar investimentos, especialmente em projetos com maior risco percebido ou em fases iniciais. Ao oferecer garantias parciais de crédito ou cobertura em caso de inadimplência, o setor público consegue reduzir a exposição dos financiadores privados, estimulando sua entrada em operações que, de outra forma, não avançariam. Estruturas desse tipo podem ser desenhadas de forma a direcionar recursos para minerais específicos, assegurando que o apoio público funcione como catalisador de novos projetos em segmentos essenciais para a descarbonização.

Complementarmente, **taxonomias verdes** podem se consolidar como um instrumento viabilizador de atração de investimentos. Estas buscam estabelecer critérios objetivos para classificar atividades econômicas como sustentáveis, criando clareza regulatória para investidores e financiadores. No Brasil, a recém-lançada **Taxonomia Sustentável Brasileira (TSB)** segue padrões internacionais e incorpora metas sociais, como a redução de desigualdades regionais e de gênero. Para o setor mineral, esse referencial pode aumentar a atratividade de capital sustentável, facilitar o acesso a linhas de crédito alinhadas a compromissos *ESG* e reduzir riscos de *greenwashing*. Ao garantir interoperabilidade com padrões externos, como os da União Europeia, a TSB também aproxima o Brasil dos grandes fluxos globais de financiamento verde.

Em conjunto, diferentes estruturas de capital e instrumentos de risco dos setores público e privado contribuem para tornar viáveis projetos de alto CAPEX e longo prazo, típicos da mineração, especialmente quando vinculados à descarbonização e à produção de minerais para a transição energética. **Continuar desenvolvendo um ambiente financeiro que compreenda essas especificidades é condição essencial para que o Brasil possa capturar seu potencial na expansão sustentável da mineração**.

Figura 40 - Exemplos recentes - Habilitadores de Financiamento

Exemplos selecionados: financiamento para projetos de descarbonização	
BNDES e Gerdau - Mineroduto e Rejeitoduto (MG) e Centro de Reciclagem (SP) *Aprovado em 2024, o crédito de R$ 566 milhões viabilizou a **substituição rodoviária e a ampliação da reciclagem de sucata,** com **redução de emissões escopos 1 e 3** estimada em 100 mil ton/ano apoiada por financiamento público*	
CBA - Captações financeiras específicas para sustentabilidade e redução de emissões *CBA tem **diversificado suas fontes de financiamento** por meio de instrumentos alinhados a critérios ESG, como **títulos verdes (green bonds)** e empréstimos vinculados à sustentabilidade **(sustainability-linked loans)***	
Exemplos selecionados: financiamento para expansão da produção de minerais para transição energética	
BNDES e Vale - FIP Minerais Estratégicos (2024) *Lançado em 2024, o FIP conta com aportes de R$ 250 mi da Vale e do BNDES e meta de investir até **R$ 1 bi em projetos de exploração, P&D e implantação** de novas minas, focando em até **20 empresas juniores e médias***	
BNDES e Finep - Plano Suporte Conjunto (2025) *Lançado em 2025, o PSC aprovou **56 projetos via chamada pública** e articulará **aporte de R$ 45,8 bi** (R$ 5 bi de investimentos diretos) via instrumentos financeiros combinados, incluindo subvenção para P&D e inovação*	
Governo da Alemanha e KfW - KfW Raw Materials Fund *Lançado em 2024, o fundo vai investir € 1 bi em **projetos de mineração, processamento e reciclagem de matérias-primas** críticas, com aportes de € 50 a 150 mi, priorizando **segurança de fornecimento para a indústria europeia***	
Export Finance Agency - Critical Minerals Facility *Desde 2021, a EFA passou a **financiar e cobrir risco de crédito em projetos estratégicos, como minerais críticos.** Um deles foi a construção da primeira refinaria de terras-raras da Austrália Ocidental, por A$ 1,25 bi, pela Iluka Resources*	

5.4 Prêmio verde e Cadeia de Valor

A descarbonização de cadeias de valor está associada à criação de condições de mercado que valorizem produtos minerais com menor pegada de carbono e alinhem incentivos ao longo da cadeia. A adoção de soluções de descarbonização na mineração, por envolver custos adicionais e novas exigências tecnológicas, dependerá em grande medida da capacidade de diferenciar e reconhecer economicamente esses produtos. Nesse sentido, mecanismos como sistemas de rastreabilidade, certificação e MRV (mensuração, relato e verificação) são essenciais para assegurar transparência e confiabilidade na comprovação de emissões e atributos ambientais.

Um componente central é a **sinalização de demanda e garantia de mercado para produtos de baixo carbono**, o que reduz incertezas para investidores e cria estímulos para que empresas internalizem custos de descarbonização. Iniciativas de prêmio verde – pagamento adicional por produtos sustentáveis – têm sido discutidas em diferentes setores industriais como forma de alinhar incentivos ao longo da cadeia de valor e permitir que soluções de menor impacto ambiental sejam financeiramente viáveis.

Por fim, a **circularidade** emerge como parte dessa agenda, promovendo o reaproveitamento de resíduos e a criação de cadeias secundárias que reduzem tanto custos de insumos quanto a pressão ambiental por novos recursos. Medidas de circularidade podem abranger desde o aproveitamento de rejeitos em novos processos até o desenvolvimento de mercados para materiais reciclados, contribuindo para reduzir a intensidade de carbono e ampliar a eficiência no uso de recursos.

5.4.1 Mecanismos de contabilidade e rastreabilidade

A **contabilidade de carbono (*carbon accounting*)** consiste no processo sistemático de medir, rastrear e reportar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) vinculadas a atividades econômicas, com propósito de transparência, responsabilidade ambiental e alinhamento com metas climáticas corporativas ou públicas. Aplicado à mineração, esse processo abrange todas as etapas – desde a extração até o beneficiamento e processos industriais – e é essencial para identificar os principais pontos emissores e orientar estratégias de mitigação.

Protocolos robustos de rastreamento, apoiados por monitoramento de dados, asseguram que **informações sobre a origem e a pegada de carbono sejam confiáveis e acessíveis**, contribuindo para gerenciar riscos socioambientais e prevenir rupturas no fornecimento global. Iniciativas como a plataforma-piloto de rastreamento por *blockchain* (*Carbon Tracing Platform*), desenvolvida no âmbito do *World Economic Forum* em parceria com grandes mineradoras, demonstram o potencial da tecnologia em garantir transparência de “mina ao produto final”.

Apesar dessas oportunidades, os desafios persistem. A qualidade dos dados é crítica, sistemas de mensuração devem ser precisos e auditáveis para evitar distorções ou *greenwashing*. Além disso, é necessário um equilíbrio entre o uso de padrões globais e a adaptação às especificidades locais da cadeia produtiva. A **colaboração entre empresas, governos e sociedade civil, bem como protocolos seguros de compartilhamento de dados e governança transparente**, são condições fundamentais para que os sistemas de rastreabilidade e contabilidade de carbono cumpram seu papel de legitimar produtos minerais de baixo carbono sem se tornarem burocráticos ou inacessíveis.

5.4.2 Circularidade

A circularidade na mineração refere-se a práticas voltadas à **redução da geração de resíduos e ao reaproveitamento de materiais ao longo da cadeia produtiva**. Essa abordagem valoriza o reuso, a reciclagem e a recuperação de subprodutos, promovendo maior eficiência no uso de recursos e mitigando impactos ambientais. No Brasil, iniciativas como projetos do Serviço Geológico para avaliar o potencial de reaproveitamento de rejeitos, ou programas corporativos que buscam transformar resíduos em insumos para setores como construção civil e siderurgia, já indicam caminhos concretos para expansão dessa agenda.

Empresas de grande porte têm desenvolvido projetos para utilizar rejeitos de minério de ferro na produção de “areia sustentável”, ou mesmo para gerar parcela da produção a partir de resíduos, reduzindo a dependência exclusiva da exploração de novos depósitos. Essas experiências demonstram que a circularidade pode contribuir tanto para reduzir riscos ambientais — ao diminuir volumes de rejeitos estocados — quanto para criar oportunidades de receita e diversificação de portfólio.

Apesar desse potencial, a adoção em larga escala ainda enfrenta barreiras significativas. A **viabilidade econômica** é um dos principais desafios, já que o reaproveitamento nem sempre se mostra competitivo frente à exploração de minério primário, especialmente em períodos de preços internacionais favoráveis às *commodities*. Além disso, há limitações tecnológicas: muitas soluções para beneficiamento de resíduos ainda estão em fase piloto e carecem de escala industrial para se tornarem economicamente viáveis.

Outro conjunto de entraves está ligado à **logística** e ao **arcabouço regulatório**. O aproveitamento de rejeitos requer transporte e processamento sob condições seguras, o que aumenta custos em regiões mineradoras remotas com infraestrutura limitada. Paralelamente, a legislação brasileira ainda não oferece parâmetros claros para a classificação e comercialização de subprodutos da mineração, gerando incerteza jurídica. Por fim, a **aceitação de mercado** também precisa ser fortalecida, o que passa pela criação de padrões de qualidade, certificações e sistemas de rastreabilidade que assegurem confiabilidade técnica e ambiental. Somente com avanços nessas frentes, a circularidade poderá se consolidar como prática estruturante no setor mineral brasileiro.

Figura 41 - Exemplos recentes - Habilitadores de Prêmio verde e Cadeia de Valor

Exemplos selecionados: sinalização e garantia de demanda
Vale e Essar – *Offtake* para *Mega Hub* de Aço Verde *Em 2023, a Vale avançou no acordo para fornecer **4 Mt/ano de pelotas e briquete**s a um* **hub *siderúrgico DRI*** *elétrico da Essar em Ras Al Khair (Arábia Saudita), garantindo **sinalização de demanda** para minério de baixa pegada de carbono*
GM e Lithium Americas - cliente industrial como comprador-âncora e acionista *Em 2023, a GM investiu **US$ 650** mi na Lithium Americas com a condição de **assegurar 100% da produção fase 1** da mina Thacker Pass (40 mil t/ano por 10 anos), **garantindo demanda** e viabilizando o financiamento de um projeto* greenfield
Exemplos selecionados: rastreabilidade, certificação e MRV
CBA - Selo Alennium para alumínio de baixa pegada de carbono *Selo Alennium **identifica produtos fabricados com alumínio de baixas emissões de carbono** – produzido com energia 100% renovável e com pegada significativamente inferior à média global. A certificação utiliza metodologia alinhada ao GHG Protocol, é verificada por terceiros, trazendo maior **transparência à cadeia de valor***
Dow - *Carbon Footprint Ledger* *Em 2024, com apoio do Boston Consulting Group, a Dow implementou um modelo de rastreabilidade que **coleta os dados reais de produção** (como consumo de energia e matérias-primas por planta) e registra em um **sistema digital interno (**ledger**),** permitindo **calcular e informar a pegada de carbono por cada tonelada** de produto produzido e vendido a cada cliente*
BHP e Circulor – Cobre *carbon neutral* com rastreabilidade integrada *Em 2021, por meio de **plataforma** **blockchain** **da Circulor,** a BHP rastreou emissões de cobre desde a mina no Chile até o cliente Southwire nos EUA, compensando integralmente o CO_2 e criando o **primeiro cátodo de cobre “carbon neutral”** por lote*
Exemplos selecionados: desenvolvimento de cadeias circulares
Vale - reaproveitamento de rejeito como areia para construção (Brucutu, MG) *Desde 2021, a Vale investiu **+R$ 50Mi em P&D em soluções para rejeitos** e já comercializou mais de 2 Mt de areia produzida a partir de minério de ferro. Produto final é **fornecido diretamente para obras públicas**, sem adaptação em infraestrutura*
Ambipar - planta de mineração urbana em São José dos Campos (SP) ***Maior planta de mineração urbana LATAM,** com capacidade de 80 mil ton/ano e contratos B2B com grandes geradores. Integra coleta, separação e venda* in loco*, viabilizando **retorno econômico direto com metais de alto valor** como cobre, ouro e lítio*
Michelin - reciclagem de pneus de mineração em Antofagasta (Chile) *Desde 2024, a Michelin opera **uma unidade industrial para reciclagem de pneus OTR** de 63”, com capacidade de 8 mil ton/ano. Alinhada à estratégia global de **economia circular,** a planta converte os pneus em chips de borracha e recupera o material metálico, ambos utilizados como insumos na produção de novos pneus*
Alcoa - reaproveitamento de resíduos industriais *Alcoa vem desenvolvendo **iniciativas de economia circular** para transformar resíduos em insumos de valor. Entre os exemplos estão o **reaproveitamento do** **spent potlining (SPL),** resíduo da fundição de alumínio, e cinzas das caldeiras*

5.5 Cenário regulatório-econômico

O ambiente regulatório e os desdobramentos econômicos associados são condicionantes centrais para o avanço da descarbonização na mineração brasileira até 2050. Políticas públicas têm influência direta nos processos decisórios das mineradoras, além de impactarem fatores relevantes em todos os outros grupos de habilitadores descritos anteriormente.

A mineração é uma atividade marcada por **projetos de longo prazo, intensivos em capital e altamente dependentes de licenciamento e segurança jurídica**. O ciclo de desenvolvimento de uma mina pode levar décadas, desde a prospecção até a operação plena, e envolve decisões financeiras de grande porte, geralmente vinculadas a compromissos de longo prazo com clientes globais.

Nesse sentido, o aperfeiçoamento de **marcos regulatórios estáveis e previsíveis** é fundamental para assegurar a atratividade do país frente à competição internacional por investimentos. A **previsibilidade e agilidade na aprovação de projetos e a clareza nas exigências legais e ambientais** continuarão tendo impacto direto sobre a capacidade do setor em incorporar inovações tecnológicas de baixo carbono e expandir a produção. A **diversidade mineral e territorial** do Brasil demandará cada vez mais, conforme a produção se expande, um arcabouço regulatório que seja, ao mesmo tempo, abrangente e **capaz de lidar com especificidades regionais,** respeitando as condições ambientais e sociais locais **tanto para projetos de mineração quanto para a infraestrutura associada** (ex. biocombustíveis, eletrificação).

Além disso, a inserção do Brasil nos mercados internacionais implica na necessidade de **convergência regulatória com diretrizes e padrões globais,** sobretudo no que diz respeito a critérios de sustentabilidade, rastreabilidade e redução de emissões de gases de efeito estufa. Nesse âmbito, ganham destaque dois temas centrais: a implementação do **Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE)** e a definição de metodologias para contabilização de **emissões líquidas.** O SBCE representa uma das principais apostas do governo para apoiar o setor produtivo em sua trajetória de descarbonização, sendo considerado um **instrumento-chave para viabilizar a transição rumo a uma economia de baixo carbono.** O sistema cria um mercado regulado no qual empresas com emissões acima de limites estabelecidos deverão reduzir ou compensar seu excedente, enquanto outras poderão negociar créditos, tornando-se o **principal instrumento de precificação de carbono no país.** Já a **contabilização de emissões líquidas** busca incorporar às métricas corporativas não apenas as emissões brutas, mas também o **sequestro de carbono** associado a práticas como a recuperação de áreas degradadas, o que confere maior precisão e legitimidade ao balanço climático das empresas.

O IBRAM reforça em seus posicionamentos a importância de um sistema robusto de **MRV (Mensuração, Relato e Verificação)** para dar **credibilidade à mensuração e reporte das emissões**, bem como da definição clara de metodologias para a contabilização de **emissões líquidas**. Também destaca a relevância de regras transparentes para o **uso de créditos de carbono (*offsets*) no âmbito do SBCE**, de modo a alinhar o Brasil às melhores práticas internacionais e estimular novos investimentos em projetos de baixo carbono. Esses temas são tratados em maior profundidade nas subseções a seguir.

De forma geral, nos últimos anos, **observa-se o fortalecimento de instrumentos legais e programas** voltados tanto para a mineração quanto para a matriz energética, evidenciando um movimento de modernização regulatória. No setor mineral, surgem iniciativas que buscam estruturar a exploração de minerais estratégicos com maior previsibilidade e atratividade. No campo energético, políticas associadas a biocombustíveis, hidrogênio e biometano criam condições para que a mineração brasileira incorpore fontes alternativas de energia em seus processos produtivos e logísticos. **Esses avanços não eliminam os desafios futuros, mas indicam que o ambiente regulatório vem se consolidando como um habilitador relevante para a transformação do setor em direção à descarbonização.**

5.5.1 Previsibilidade e agilidade de licenciamento

A previsibilidade e a agilidade de licenciamento figuram entre os aspectos mais relevantes do ambiente regulatório para o futuro da mineração brasileira. Esses fatores estão **diretamente ligados à capacidade de transformar o potencial mineral do país em oferta efetiva para as cadeias globais em tempo hábil**, especialmente no caso dos minerais para a transição energética. O avanço de novas operações depende de processos de autorização que consigam responder de forma consistente às exigências de mercado e aos compromissos internacionais de redução de emissões.

Um fator central está relacionado à **previsibilidade dos prazos de tramitação**. A complexidade natural do processo regulatório, que envolve diferentes etapas e esferas de governo, pode gerar incertezas para investidores e dificultar a programação de projetos de baixo carbono. Avançar nesse aspecto passa não apenas pelo aperfeiçoamento de normas, mas também pelo fortalecimento da coordenação entre instâncias federais, estaduais e municipais.

É importante destacar que, independentemente da busca pelo aperfeiçoamento da estrutura regulatória, **a credibilidade, a efetividade dos processos e o compromisso das empresas com a sociedade e o meio ambiente** devem ser preservadas como parte essencial do próprio habilitador. A busca por maior celeridade não pode ser dissociada da manutenção de análises técnicas robustas, nem da garantia de que **padrões de segurança operacional, de gestão de riscos socioambientais e de cumprimento das obrigações legais e compromissos assumidos pelas mineradoras** sejam plenamente observados. Em um país de elevada diversidade territorial e socioambiental, **esse equilíbrio será determinante para que o licenciamento se consolide** como instrumento capaz de oferecer simultaneamente segurança jurídica, aceitação social, estabilidade das operações e condições favoráveis à expansão da produção e à adoção de soluções tecnológicas de menor intensidade de carbono.

5.5.2 A precificação do carbono e o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões

A precificação do carbono é um habilitador central para a jornada de descarbonização na medida em que, ao estabelecer um valor econômico para as emissões, direciona investimentos e promove a competitividade de soluções de baixo carbono no setor mineral. Neste estudo, foram utilizadas como referências as projeções da *International Energy Agency (IEA)* nos cenários *Announced Pledges (APS) e Net Zero by 2050 (NZE),* que indicam valores entre US$ 65–125/tCO_2e em 2035 e US$ 160–200/tCO_2e em 2050, para definição dos níveis de adoção das alavancas e projeção da expansão dos minerais para a transição energética.

O avanço de mecanismos de precificação de carbono tem implicações diretas para a competitividade da mineração brasileira. A discussão já vem sendo materializada no Brasil por meio do **Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE),** que busca alinhar o país às práticas internacionais. Esse sistema prevê a criação de um mercado regulado de créditos de carbono, no qual empresas com emissões acima de limites estabelecidos deverão compensar ou reduzir suas emissões, enquanto outras poderão comercializar excedentes de reduções obtidas.

No contexto da mineração, a introdução de um preço de carbono tende a atuar como um **catalisador da transformação tecnológica** em diversos setores através do aumento de custos de processos mais intensivos em emissões. Esse movimento estimula investimentos em eficiência energética, eletrificação e fontes renováveis, mas seus efeitos vão além da fronteira nacional. Dada a característica da mineração brasileira de alimentar cadeias produtivas globais de setores como indústria, transporte e energia, **o preço de carbono definido em diferentes países terá papel decisivo** em moldar a demanda por minerais de menor intensidade de carbono, podendo consolidar uma vantagem competitiva para o Brasil no fornecimento de insumos estratégicos.

Para que a precificação de carbono se traduza em ganhos efetivos para o setor e para a economia brasileira, é importante que sua implementação seja bem calibrada para não prejudicar a **competitividade e garantir investimentos para uma transição justa e equilibrada.** A adoção desse instrumento deve ser acompanhada de inovação tecnológica, aumento de eficiência e diversificação da matriz energética, de forma a **ampliar a atratividade do Brasil como fornecedor de minerais.** Além disso, ajustes de fronteira podem desempenhar um papel relevante para evitar distorções competitivas e mitigar riscos de fuga de carbono, preservando as condições para que o país se consolide como protagonista na agenda de descarbonização.

O IBRAM afirmou em posicionamento público que **o setor de mineração apoia a criação do SBCE,** reconhecendo que o modelo de *cap and trade* garante maior flexibilidade e eficiência no processo de redução de emissões. Ainda, destaca a importância de estabelecer um **processo cooperativo,** envolvendo governo, academia, sociedade civil e indústria, para garantir segurança jurídica e confiabilidade ao mercado a partir de uma **estrutura técnica equilibrada e representativa.**

Entre os desafios futuros, destaca-se a necessidade de clareza quanto às regras de **monitoramento, reporte e verificação** das emissões, para garantir credibilidade ao sistema. Além disso, a definição de parâmetros de transição, como os **limites iniciais de emissões e a forma de alocação de permissões,** será determinante para assegurar previsibilidade ao setor e viabilizar o planejamento de longo prazo. Nesse cenário, a precificação de carbono por meio do SBCE se configura como um habilitador central, capaz de alinhar os incentivos econômicos com as metas de descarbonização e promover maior integração da mineração brasileira aos mercados globais de baixo carbono.

5.5.3 Contabilização de soluções de recuperação de áreas e sequestro de carbono

A **contabilidade de emissões líquidas** – ou seja, o registro das emissões brutas descontado o sequestro de carbono por meio da recuperação de áreas de vegetação – tem sido um tema amplamente discutido, mas ainda em evolução no âmbito corporativo. Desde 2020, o *GHG Protocol* tem trabalhado no desenvolvimento do *Land Sector and Removals Guidance,* voltado a **sistematizar o reconhecimento de reduções e remoções de carbono,** incluindo aquelas provenientes de restauração ecológica, uso do solo e tecnologias de remoção.

Apesar de disponível como um rascunho para testes pilotos desde 2022, a versão final dessa orientação ainda não foi publicada. A ausência de um referencial tem limitado a capacidade das mineradoras (e outras empresas) de **incorporar oficialmente o sequestro de carbono em seus inventários** – ou seja, contabilizar de forma robusta as emissões líquidas em vez das brutas. Quando consolidada, essa definição permitirá que mineradoras incorporem práticas de sequestro de carbono em seus relatórios – reconhecendo formalmente o impacto positivo de ações como recuperação de vegetação ou iniciativas de reflorestamento.

5.6 Habilitadores de âmbito internacional e a COP30

Entre os habilitadores discutidos, alguns merecem destaque especial por **dependerem de cooperação internacional e alinhamento a padrões globais.** No contexto da COP30 no Brasil, estes habilitadores ganham centralidade, dada a oportunidade única de acelerar avanços em mecanismos de governança internacional que podem fortalecer o setor mineral brasileiro e sua relevância estratégica na transição energética global.

A seguir, são destacados cinco habilitadores internacionais de alta relevância para a mineração brasileira assegurar reconhecimento internacional das práticas de baixo carbono do Brasil, ampliar o acesso a mercados e investimentos e garantir que as especificidades nacionais, como o uso de energias renováveis e a restauração florestal, sejam valorizadas por cadeias de valor globais:

- **Contabilidade de carbono no nível do produto**

  Sistemas de contabilidade que capturem as emissões no nível do produto, com foco em mensuração precisa e rastreável por bem comercializado. Essa prática é essencial para permitir o reconhecimento de diferenciais climáticos, como o uso de biocombustíveis ou matriz energética renovável, em mercados regulados e negociações internacionais, aumentando a competitividade dos produtos da mineração brasileira.

- **Harmonização de sistemas domésticos com padrões internacionais**

  Compatibilização dos sistemas domésticos de contabilidade de carbono com mecanismos internacionais de fronteira, como o *Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM)*, de forma a assegurar reconhecimento mútuo e evitar barreiras comerciais, viabilizando o comércio exterior de produtos com menor intensidade de carbono.

- **Contabilização pelo *GHG Protocol* de remoções por restauração**

  A inclusão oficial de remoções de CO_2 por restauração e recuperação de áreas no escopo do *GHG Protocol* permitiria que empresas mineradoras contabilizassem esses esforços em seus inventários corporativos. Essa mudança é crucial para valorizar práticas de restauração florestal e recuperação ambiental, nas quais o Brasil possui vantagens competitivas, além de ampliar a credibilidade internacional das ações do setor.

- **Taxonomias verdes para mineração e cadeias produtivas**

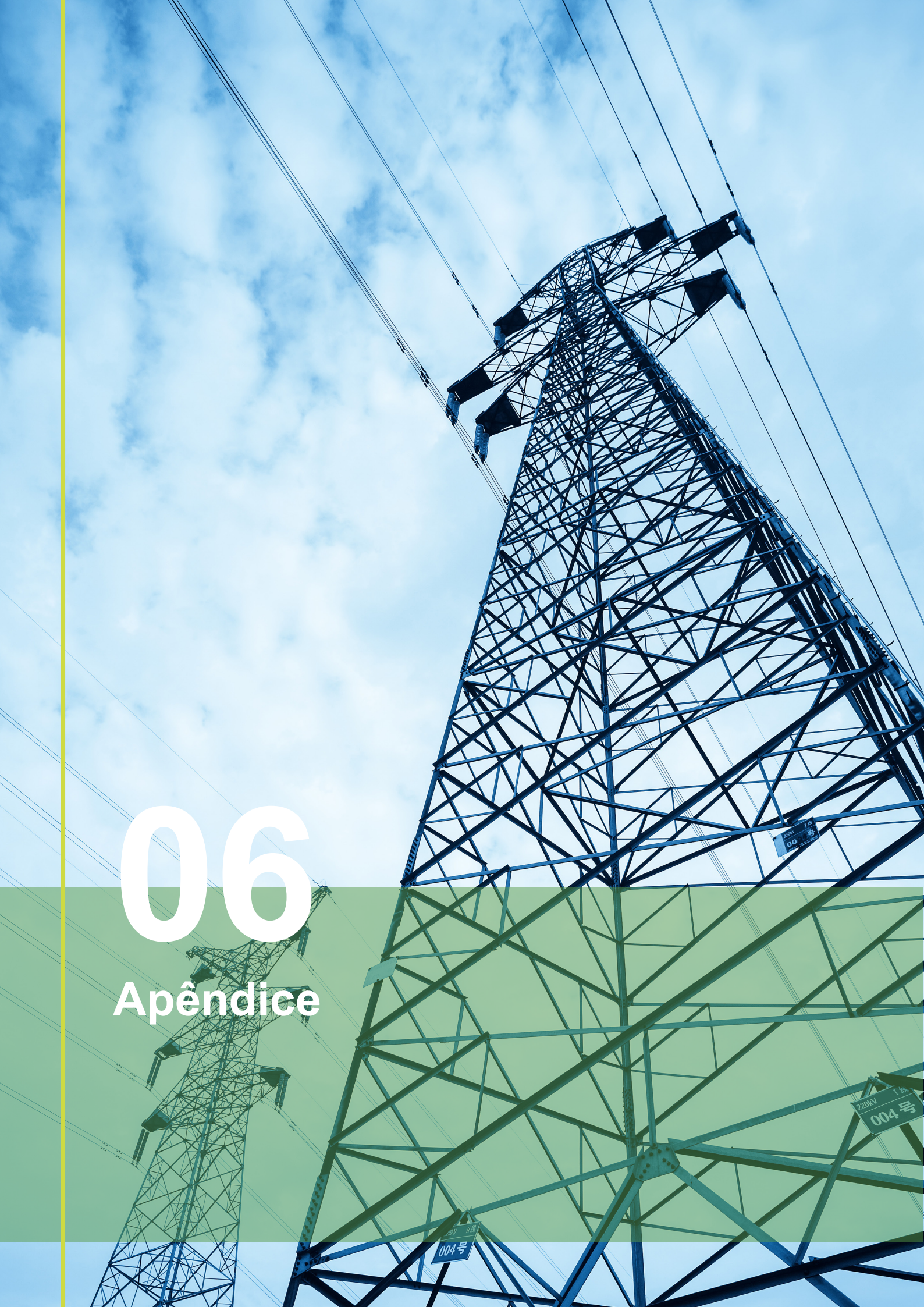
  A convergência entre taxonomias verdes nacionais e internacionais é essencial para assegurar que projetos de mineração de baixo carbono sejam elegíveis a financiamento sustentável e atraentes para investidores globais. Essa harmonização amplia o acesso a capitais e integra a mineração brasileira a um ecossistema global de finanças sustentáveis, viabilizando novos investimentos em tecnologias limpas.

- **Mercado global de hidrogênio de baixa emissão**

  O estabelecimento de padrões internacionais de certificação e comércio de hidrogênio de baixa emissão é estratégico para a mineração, tanto pelo potencial de uso direto do hidrogênio em processos industriais quanto pela possibilidade de exportação. A participação do Brasil na construção desse mercado global pode posicionar o país como fornecedor competitivo, aproveitando sua matriz elétrica renovável para produzir hidrogênio com pegada de carbono reduzida.

Figura 42 - Exemplos recentes – Cenário regulatório-econômico

Exemplos selecionados: expansão da produção de minerais para a transição energética	
PNMCE - Política Nacional de Minerais Críticos e Estratégicos (Projeto de Lei 2780/24, em tramitação na Câmara) *Com foco em atração de capital e fortalecimento e previsibilidade regulatória, o projeto propõe um marco legal com governança específica, lista oficial de minerais estratégicos, instrumentos de incentivo e licenciamento prioritário*	
União Europeia - *Critical Raw Materials Act* (2023) *O CRMA define metas mínimas de produção, refino e reciclagem de minerais críticos na UE até 2030 e impõe **prazos máximos para licenciar projetos estratégicos:** 24 meses para mineração, 12 para plantas industriais*	
Canadá - *Critical Minerals Strategy* (2022) *A estratégia nacional criou iniciativas de força tarefa e, com a **diretriz "Um Projeto, Um Processo"** , reformou normas para **cortar sobreposição regulatória,** unificar licenças e consultas e **reduzir prazos de aprovação** de 10~15 anos para 2~7 anos*	
Exemplos selecionados: incentivo a combustíveis alternativos	
PNPB - Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (2004) – B14, 2025 *Com metas progressivas de mistura biodiesel e diesel fóssil, tem permitido evolução gradual da cadeia do biodiesel no Brasil*	
RenovaBio - Política Nacional de Biocombustíveis (2017) *Com +180 milhões de CBIOs negociados desde 2020, transforma a redução de emissões em um ativo financeiro negociável*	
Novo Mercado do Gás (Lei 14.134/2021) *Com +20 novos agentes autorizados desde 2021, amplia rotas de gás e biometano em plantas industriais e corredores logísticos*	
PNH2 - Programa Nacional do Hidrogênio (2022) *Com certificação de 2024, estrutura o rastreamento de H_2 renovável e habilita uso em processos industriais e logísticos*	
Lei do Combustível do Futuro (2024) *Com metas progressivas até 2037, unifica biodiesel, H_2 e biometano em arcabouço regulatório com certificação emetas vinculantes*	
Programa Metano Zero (2022) *Combina incentivos, crédito e desoneração para incentivar o aumento da produção e viabilidade econômica do biometano*	



06
Apêndice

6.1 Fontes

Instituição	Documento	Ano da publicação	Breve descrição
IBRAM	Setor Mineral	2024	Dados históricos e projeções financeiras para o setor mineral
	Construção e Análise da Curva de Custo Marginal de Abatimento da Mineração	2025	Referências de custo para alavancas de descarbonização
	Os minerais críticos e estratégicos na COP30	2025	Visão de desafios e habilitadores
	Contribuição da indústria da mineração para o G20	2024	Visão de desafios e habilitadores, perspectivas para MCE
	Mineração resiliente	2021	Visão de desafios e habilitadores
	Práticas em circularidade no setor mineral	2024	Exemplos de caso em circularidade no Brasil
Ministério de Minas e Energia	Estudos para o Plano Nacional de Mineração 2050	2023	Produção, reservas e projeções para Brasil e mundo
	Minerais críticos e estratégicos para a transição energética	2025	Produção e reservas dos principais minerais críticos extraídos no Brasil
	Guia para o investidor estrangeiro em minerais críticos no Brasil	2024	Visão geral do processo de mineração brasileiro e oportunidades
	Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação à Mudança do Clima na Mineração	2013	Referência de alavancas para descarbonização da mineração
IEA	The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions	2022	Principais aplicações dos minerais para transição energética
	Breakthrough agenda report 2024	2024	Projeções de crescimento em volume de minerais
	Global Critical Minerals Outlook, Data Explorer	2025	Projeções de demanda para 34 minerais selecionados
USGS	Mineral Commodity Summaries (USGS)	2024	Produção e reservas de 88 bens minerais globalmente
Climate Trace	Climate Trace	2024	Dados de emissões por setor
Observatório do Clima	SEEG 12.0	2023	Dados de emissões por setor
Vale	Relatório Integrado Vale	2024	Valores de emissões e quebras por processos
Wood Mackenzie	Aluminium at a crossroads: synchronising supply growth with decarbonisation	2025	Projeções de demanda para bauxita para transição energética

6.2 Lista longa de alavancas avaliadas

Categoria	Mina	Planta
Eficiência e inovação em processos	• Substituição de caminhões por correias transportadoras • Otimização de rotas na mina - Digitalização para troca de dados em tempo real (gêmeo digital) • Analytics e machine learning para análise de dados geológicos • Emprego de equipamentos autônomos • Machine learning para otimizar combustível (qualidade, pressão e temperatura dos pneus, monitoramento de condições da estrada) • Analytics para otimizar uso de explosivos • Beneficiamento na área da mina para reduzir deslocamentos e emissões • Aumentar eficiência de caminhões • Automatizar sistemas de ventilação e bombeamento	• Partidas controladas e eficiência no bombeamento • Rebobinagem de motores antigos • Iluminação LED (operação noturna) • Manutenção preditiva de equipamentos • Otimizar equipamentos de britagem para maior eficiência energética
Substituição de combustível	• Substituição parcial e total de diesel por biocombustíveis (biodiesel, etanol, biometano, HVO) • Mistura de gás com diesel (blending dinâmico)	• Substituição de geradores a diesel por gás liquefeito • Substituição de geradores a diesel por bio-óleo
Eletrificação e *power-to-X*	• Uso de equipamentos LHD híbridos ou elétricos e pás elétricas • Implementação de sistemas de tração auxiliar (*trolley assist*) • Implementação de caminhões movidos a bateria (BEV) • Células de hidrogênio para caminhões (FCEV) • Uso de explosivos à base de amônia verde	• Substituição de geradores a diesel por geradores a hidrogênio de baixo carbono • Substituição de geradores a diesel por energia do grid
Fornecimento de energia renovável	• Contratos de energia (PPAs) com fontes renováveis • Geração de energia solar/eólica nas instalações da mina (ex: telhados, pilhas de rejeito) • Baterias para armazenamento complementar de energia renovável	
Uso da terra e florestas	• Mineração Circular e com reaproveitamento de resíduos • Proteção e recuperação de florestas	

6.3 Premissas para modelagem

Alavancas descarbonização no setor da mineração:

			Adoção 2035			Adoção 2050			
Categoria	**Alavanca**	**Potencial de Mitigação**	**Ferro**	**Ouro**	**Bauxita**	**Ferro**	**Ouro**	**Bauxita**	**Métrica**
Substituição de combustíveis	Acréscimo na substituição parcial do diesel por biocombustíveis na frota sem necessidade de grandes modificações nos motores (drop-in – B12 > B25/B30)	15-20% (B12> B25/B30)	100%	100%	100%	0%	0%	0%	Parcela da frota com B25/B30
	Adoção de biocombustíveis na frota, com substituição total ou parcial do diesel por blends de maior proporção	25%-30% (B25/B30>B50) 95%-100% (B12>B100))	20%	20%	30%	30%	20%	20%	Parcela da frota com B50 (2035) Parcela da frota com B100 (2050)
	Acréscimo na substituição parcial do diesel por biocombustíveis em equipamentos de combustão estacionária sem necessidade de grandes modificações nos motores (drop-in – B12 > B25/B30)	15-20% (B12> B25/B30)	100%	100%	100%	0%	0%	0%	Parcela dos equipamentos estacionários com B25/ B30equipamentos estacionários com B25/B30
	Adoção de biocombustíveis em equipamentos de combustão estacionária, com substituição total ou parcial do diesel por blends de maior proporção	25%-30% (B25/B30>B50) 95%-100% (B12>B100)	20%	20%	30%	100%	100%	100%	Parcela dos equip. com B50 (2035) Parcela dos equip. com B100 (2050)
Eletrificação e *power-to-X*	Implementar pás elétricas e LHDs visando substituir as alternativas a diesel por soluções mais limpas	100%	0%	30%	10%	60%	80%	50%	Da frota
	Implementar caminhões movidos a bateria (BEV) para substituir as alternativas a diesel	100%	0%	5%	5%	40%	50%	50%	Da frota
	Implementar caminhões fora-de-estrada FCEV substituindo caminhões a diesel por alternativas movidas a célula de combustível de hidrogênio	100%	0%	0%	0%	30%	30%	30%	Da frota

	Implantar *trolley assist* em caminhões de transporte, conectando-os a cabos aéreos durante as subidas para diminuir a necessidade de diesel nas rampas	90 – 100%	15%	15%	10%	35%	40%	15%	Das minas
Energia renovável	Implementar PPAs solares e eólicos para eliminar o Escopo 2 e fomentar a eletromobilidade	100%	80%	30%	30%	85%	50%	50%	Da eletricidade comprada
	Adotar solar fotovoltaico on-site (pilhas, telhados) para instalar PV em áreas não utilizadas e contribuir para o suprimento parcial da planta	100%	10%	20%	20%	15%	45%	45%	Da demanda do site
Eficiência e inovação em processos	Utilização de correias transportadoras para substituir parte do transporte realizado por caminhões	60 – 70%	25%	25%	10%	50%	50%	30%	Das minas
	Aumentar a eficiência de rotas (digitalização, telemetria e sequenciamento) e eficiência dos veículos (pneus LRR e motores) para reduzir o consumo de diesel	5%	70%	50%	50%	90%	100%	100%	Frota com despacho otimizado
	Otimizar equipamentos de britagem e moagem para maior eficiência energética	5 – 10%	30%	30%	30%	90%	90%	90%	Britadores otimizados

Alavancas descarbonização na cadeia do ferro:

Categoria	Alavanca	Potencial de Mitigação	Adoção 2035	Adoção 2050	Métrica
Produtos para siderurgia	Adaptar/expandir linhas de pelotização existentes para DR-grade, para fornecer pelotas de alta pureza que habilitam rotas DRI-EAF a gás ou hidrogênio renovável	40-90% (B12> B25/B30)	~10%	~10%	% do Fe exportado em pelotas DR-grade
	Utilizar a aglomeração a frio para formação de briquetes, transformando finos de minério sem sinterização nem forno de pelotas, viabilizando rotas DRI ou carga parcial em altos-fornos	25%-30% (B25/B30>B50) 95%-100% (B12>B100))	~1%	~2%	% do Fe exportado em pelotas DR-grade
Navegação de longo curso	Priorizar contratos que exijam sistemas de eficiência energética em navios como slow steaming, tintas antiatrito, uso de velas etc.	65 – 90%	30-60%	100%	Volume transportado em navios dual-fuel/ baixo carbono
	Priorizar contratos que exijam sistemas de eficiência energética em navios como slow steaming, tintas antiatrito, uso de velas etc.	5 – 30%	30-70%	100%	Volume transportado em navios dual-fuel/ baixo carbono
	Implantar planejamento logístico integrado (porto–mina–navio), reduzindo esperas em porto, aumentando taxa de ocupação, percentual de backhauling e evitando partidas subótimas	2 – 5%	10%	50%	% das minas
Pelotização	Empregar biocarbono/carvão vegetal durante a pelotização com o objetivo de substituir parte do carvão no processo de queima	95 – 100%	7%	30%	Substituição de carvão mineral por biocarbono / carvão vegetal
	Utilizar biocombustíveis como bio-óleo ou biometano como substituto ao gás natural nos fornos de pelotização	95 – 100%	5%	20%	Substituição de GN por biocombustíveis
	Empregar captura de CO_2 em fornos ou caldeiras, para eliminar emissões via injeção em reservatório geológico	80 – 90%	0%	100%	Das chaminés
	Utilizar hidrogênio de baixo carbono como fonte de calor nos fornos de pelotização, substituindo parcial ou totalmente o gás natural	100%	0%	15%	Substituição de GN por hidrogênio de baixo carbono
	Implementar PPAs solares e eólicos para eliminar o Escope 2 e fomentar a eletromobilidade	100%	100%	100%	da eletricidade comprada

6.4 Detalhamento das projeções de produção de minerais para a transição energética

6.4.1 Bauxita

Projeções Wood Mackenzie indicam ***CAGR* de 0,7%** para a **demanda global** no cenário *Country Pledges*, adotado como ***lower range*** da projeção

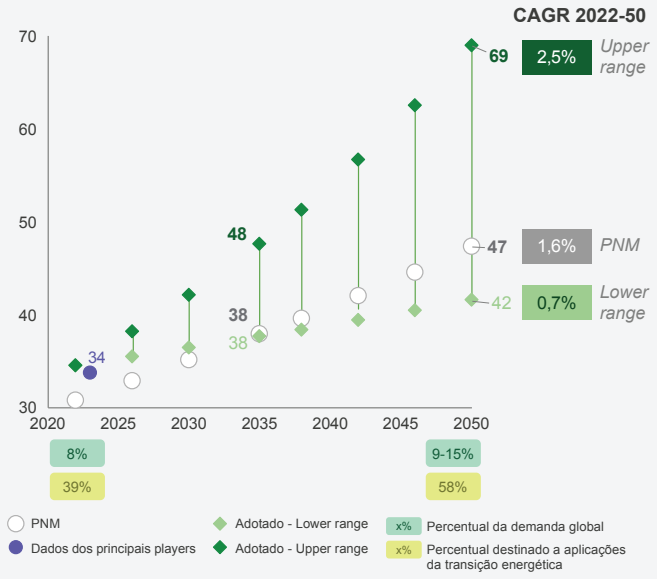
No cenário ***Net Zero***, projeção da demanda para transição energética apresenta ***CAGR* de 2,5%**, utilizado como parâmetro para o ***upper range*** da estimativa

Projeções do **PNM**, com *CAGR* de **1,6%**, permanecem **dentro do intervalo projetado** no longo prazo

Dados disponíveis dos principais *players* somam produção de **~34 Mton de bauxita em 2023**

- **MRN:** projeta manter produção atual de ~12,7 Mt de bauxita
- **Norsk Hydro (Paragominas):** produção atual de ~11 Mt de bauxita, sem planos de expansão da capacidade
- **Alcoa:** produção atual de ~6,3 Mt de bauxita, sem planos de expansão da capacidade
- **CBA:** produção atual de ~1,9 Mt de bauxita
- **TGM:** produção atual de ~1,6 Mt de bauxita

Produção brasileira de bauxita (Mton, 2022-2050)



Nota: Considerando que são necessárias 5 toneladas de bauxita para produzir 1 tonelada de alumínio
Fontes: *USGS*, *Wood Mackenzie*, Brasil Mineral, Estudos para o PNM 2050, Relatórios das empresas

6.4.2 Manganês

Projeção do **PNM** indica ***CAGR* de 4,0%**, aplicado à produção atual para calcular o ***upper range*** do intervalo projetado[1]

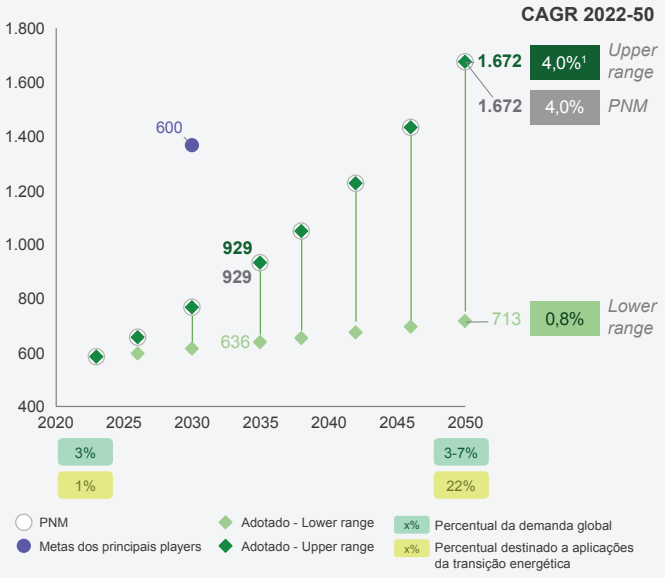
No cenário *Net Zero*, projeção da demanda para transição energética apresenta taxa de crescimento de 14% ao ano, não considerado para definir o *range* adotado, já que o percentual da produção destinado a essas aplicações é pouco significativo (~1%)

IEA indica ***CAGR* de 0,8%** para a **demanda global** no cenário *Announced Pledges*, adotado como ***lower range*** da projeção e 0,9% no cenário *Net Zero* (dentro do intervalo)

Projetos de expansão dos principais *players* indicam produção de ~1365 kton de manganês até 2030, significativamente mais otimista que o *upper range* adotado

- **Butirama:** objetivo de atingir 2,8 Mton de minério de manganês (~1,1 Mt de manganês metálico[2]) sem prazo público definido – foi adotado 2030 como ano alvo
- **LHG Mining (J&F):** projeções de produção para 2030 não disponíveis – foi adotada produção atual de 450 kton de minério de manganês (~180 kton de manganês metálico[2])
- **Nexus:** projeções de produção para 2030 não disponíveis – foi adotada capacidade atual divulgada de 163 kton de minério de manganês (~65 kton de manganês metálico[2])

Produção brasileira de manganês (kton contidas, 2022-2050)



1. Foi aplicado o *CAGR* da projeção do PNM à produção divulgada pelo *USGS* em 2023 (em linha com relatório do EPE de 2025) **2.** Considerando teor de 40% de manganês metálico
Fontes: *USGS*, *IEA*, Estudos para o PNM 2050, Relatórios das empresas

6.4.3 Cobre

Projeção do **PNM** indica ***CAGR* de 4,4%**, correspondente ao *upper range* do intervalo projetado

Cenário *Announced Pledges* da *IEA* indica ***CAGR* de 1,5%** para a demanda global, adotado como ***lower range***

No cenário ***Net Zero*** da *IEA*, projeções de demanda apresentam *CAGRs* de **1,7% (global) e 3,7% (transição energética)**, ambos dentro do intervalo projetado

Projetos de expansão dos principais *players* apontam para produção de **~419 kton de cobre até 2030, dentro do *range* adotado**

- **Vale:** com produção de 350 kton de cobre em 2024 (sendo ~270 kton no Brasil), pretende chegar a 420~500 kton em 20301
- **Lundin:** produção média de ~20 kton de cobre nos últimos 4 anos deve crescer ~30% até 2030
- **Mineração Vale Verde:** projeções de produção para 2030 não disponíveis – foi adotada produção atual de ~20 kton de cobre da mina Serrote
- **Ero Group:** projeções indicam produção de ~18 kton em 2030

Produção brasileira de cobre (kton contidas, 2022-2050)



1. Foi considerado o mesmo percentual da produção global no Brasil para calcular a meta da Vale para 2030
Fontes: *USGS*, *IEA*, Estudos para o PNM 2050, Relatórios das empresas

6.4.4 Zinco

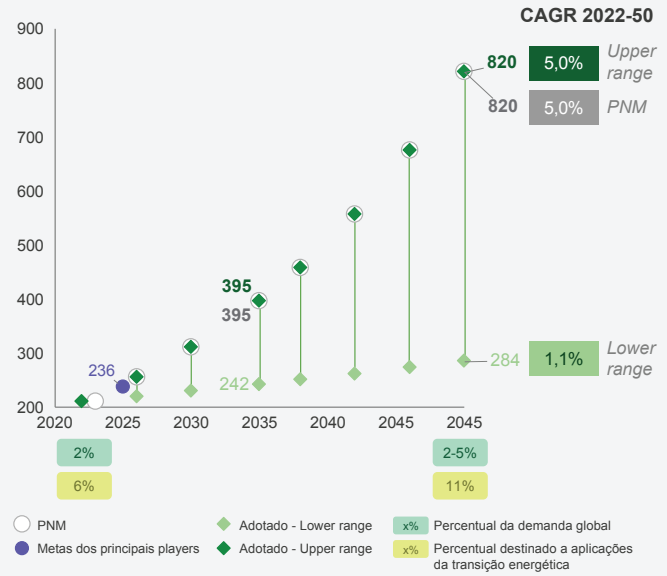
Projeção do **PNM** indica ***CAGR* de 5,0%**, aplicado à produção atual para calcular o ***upper range*** do intervalo projetado

IEA indica ***CAGR* de 1,1%** para a **demanda global**, tanto no cenário *Announced Pledges* quanto no *Net Zero*, valor adotado para o ***lower range*** da projeção

Dados dos principais *players* no Brasil indicam produção de **~236 kton de zinco em 2025**, em linha com *range* adotado

- **Nexa:** com expansão em Aripuanã, deve produzir ~216 kton de zinco até 2025
- **Mineração Santa Elina:** projeções para 2025 não disponíveis – foi utilizado volume de 20 kton divulgado em 2021[1]

Produção brasileira de zinco (kton contidas, 2022-2050)



1. Considerando produção nacional de ~160 kton (Sumário Mineral) e produção da Nexa de 140 kton
Fontes: *USGS*, *IEA*, Estudos para o PNM 2050, Relatórios das empresas

6.4.5 Silício

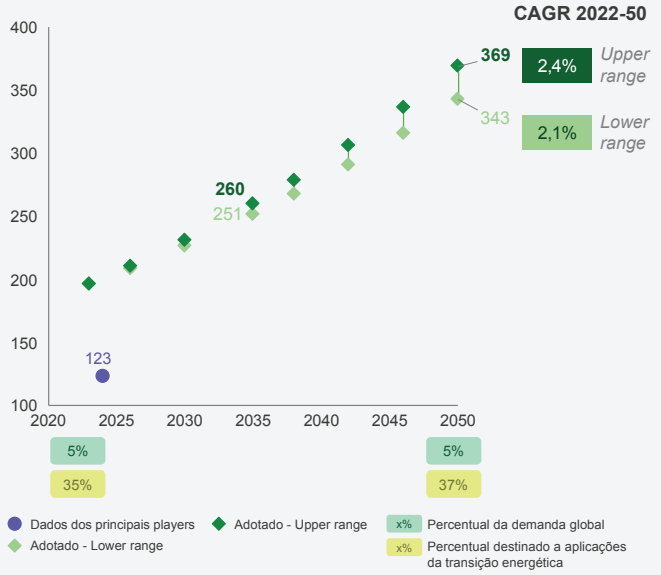
Cenário *Announced Pledges* da *IEA* indica ***CAGR* de 2,1%** para a demanda global, adotado como ***lower range***

No cenário ***Net Zero***, projeção de demanda para transição energética apresenta taxa de crescimento de **2,4%** ao ano, utilizada para calcular o ***upper range*** do intervalo; projeção da demanda global apresenta *CAGR* de 2,2%, dentro do intervalo adotado

Dados disponíveis dos principais *players* somam produção de **~123 kton de silício em 2024**

- **Liasa:** em 2020, anunciou investimento para aumentar capacidade produtiva para ~83 kton até 2024
- **Minasligas:** projeções de produção não disponíveis – foi adotada capacidade divulgada de 40 kton de silício metálico
- **Rima** (maior produtora de silício no Brasil[1]): dados de volume não divulgados publicamente

Produção brasileira de silício metálico (kton contidas, 2022-2050)



Nota: PNM 2050 não apresenta projeções para produção de silício **1.** Segundo *website* da própria empresa
Fontes: *USGS*, *IEA*, Estudos para o PNM 2050, Relatórios das empresas

6.4.6 Nióbio

Cenários ***Net Zero* e *Announced Pledges*** da *IEA* indicam ***CAGR* de ~1,3%** para a demanda global de nióbio

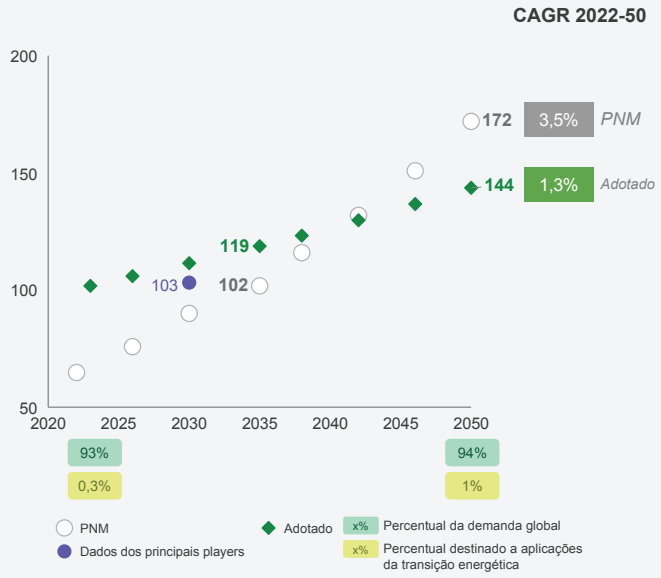
No cenário ***Net Zero***, taxa de crescimento da demanda para aplicações da **transição energética chega a 7%** – valor não considerado nas projeções, dada a baixa relevância do volume frente à demanda total **(0,3%)**

Projeções PNM (2022) partem de um volume significativamente inferior ao *USGS* (2023) por terem sido elaboradas em um contexto de menor produção nacional. Além disso, o PNM projeta, para 2050, uma **produção superior à demanda global de nióbio**. Portanto, o *CAGR* PNM de 3,5% não foi usado na projeção adotada

Dados disponíveis dos principais *players* no Brasil indicam produção de **~103 kton de nióbio em 2030**, mais próximo do volume adotado por este estudo

- **CBMM:** projeções não disponíveis – foi adotada capacidade atual de 150 kton de ferronióbio (~90 kton de nióbio[1])
- **CMOC Brasil:** projeções não disponíveis – foi adotada produção atual de 10 kton de nióbio
- **Taboca:** foi considerado potencial de aumento de produção de 1,6 para 3,2 kton por ano de nióbio metálico até 2030

Produção brasileira de nióbio (kton contidas, 2022-2050)



1. Considerando teor de nióbio de 60% no FeNb
Fontes: *USGS*, *IEA*, Estudos para o PNM 2050, Relatórios das empresas

6.4.7 Níquel

Cenário ***Announced Pledges*** da *IEA* indica ***CAGR* de 3,0%** para a demanda global, adotado como ***lower range***

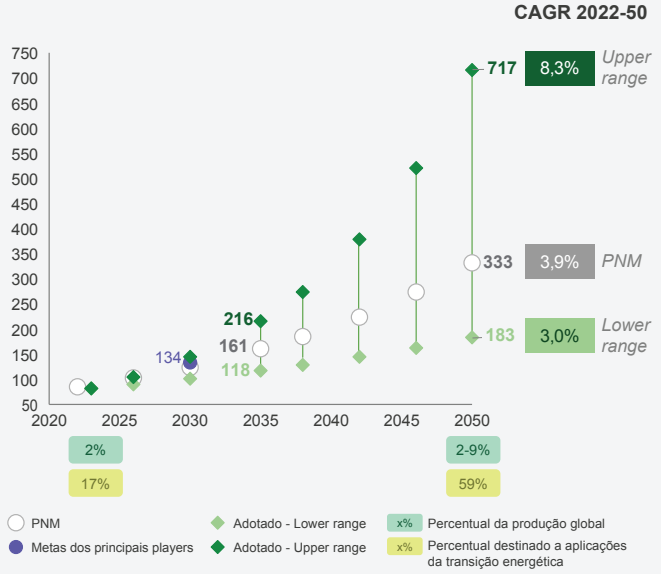
No cenário ***Net Zero da IEA***, projeção da demanda para transição energética apresenta *CAGR* de **8,3%**, utilizado como parâmetro para o ***upper range*** da estimativa

Projeções do **PNM**, com *CAGR* de 3,9%, permanecem **dentro do intervalo projetado** ao longo do tempo

Projetos de expansão dos principais *players* somam produção de **~134 kton de níquel até 2030**, em linha com *range* adotado

- **Vale:** expansão em Onça Puma deverá elevar produção anual da Vale de 27 kton para 42 kton de níquel até 2030
- **MMG** (operação vendida pela Anglo American): projeções para 2030 não disponíveis – foi adotado guidance de ~39 kton para 2025
- **Wave Nickel Brasil:** projeções para 2030 não disponíveis – foi adotada capacidade da planta de Niquelândia de 20 kton anuais
- **Brazilian Nickel:** projeções para 2030 não disponíveis – foi adotada capacidade esperada de ~18 kton de níquel ao ano com a expansão do Piauí Nickel Project
- **Atlantic Nickel:** projeções para 2030 não disponíveis – foi adotada capacidade divulgada de 15 kton ao ano

Produção brasileira de níquel (kton contidas, 2022-2050)



Fontes: *USGS*, *IEA*, Estudos para o PNM 2050, Relatórios das empresas

6.4.8 Grafite

Cenário ***Announced Pledges*** da *IEA* indica ***CAGR* de 3,5%** para a demanda global, adotado como ***lower range***

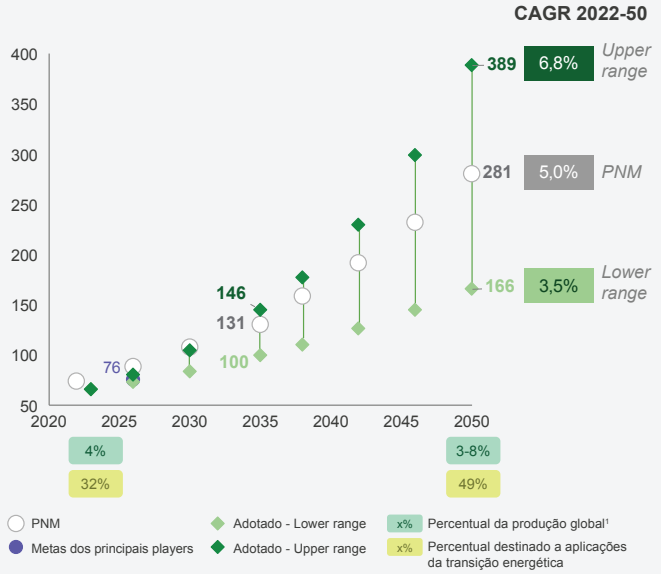
No cenário ***Net Zero da IEA***, projeção da demanda para transição energética apresenta *CAGR* de **6,8%**, utilizado como parâmetro para o ***upper range*** do intervalo

Projeções do **PNM**, com *CAGR* de 5%, permanecem **dentro do intervalo projetado** no longo prazo

Produção dos principais *players* indica **~76 kton de grafite até 2026**, dentro do *range* adotado

- **Nacional do Grafite:** projeções de produção não disponíveis – foi adotada produção atual de 70 kton de grafite por ano
- **Graphcoa:** almeja capacidade de 5,5 kton por ano até final de 2026

Produção brasileira de grafite (kton contidas, 2022-2050)



1. Considerando grafite natural
Fontes: *USGS*, *IEA*, Estudos para o PNM 2050, Relatórios das empresas

6.4.9 Vanádio

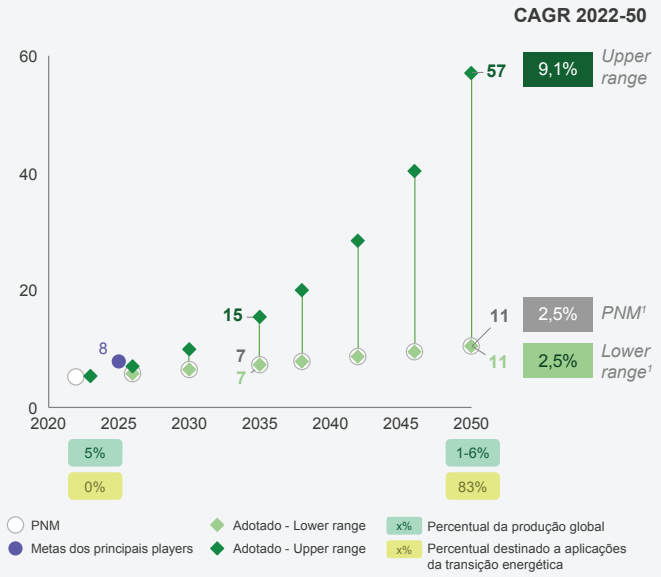
Projeções do **PNM** indicam ***CAGR* de 2,5%**, aplicado à produção atual para calcular o ***lower range*** do intervalo projetado[1]

Cenário ***Net Zero*** da *IEA* indica *CAGR* de **9,1%** para a demanda global, aplicado ao ***upper range*** da estimativa; não foi utilizada a taxa de crescimento de aplicações da transição energética, visto que demanda atual é nula

Dados dos principais *players* indicam produção de **~8 kton de vanádio em 2025**

- **Largo Inc.:** *guidance* de 9,5–11,5 kton de V2O5 para 2025 (foi adotado o volume mais otimista, correspondente a ~6,4 kton de vanádio metálico[2])
- **Jangada Mines:** almeja atingir volume de ~1,5 kton ao ano com o projeto Pitombeiras[2 3]
- **BMIX** (vinculada à Brazil Minerals): realizou aquisição de direitos para desenvolver projeto de vanádio no Piauí em 2013, ainda sem projeções de produção

Produção brasileira de vanádio metálico (kton contidas, 2022-2050)



1. Foi aplicado o *CAGR* da projeção do PNM à produção divulgada pelo *USGS* em 2023 (5,42 kton de vanádio contido em 2023); PNM parte de volume de produção de 14 kton em 2022, chegando a 28,5 kton em 2050 (ainda dentro do *range* projetado) **2.** Considerando 56% de vanádio metálico no V_2O_5 3. Considerando 23,5 kton de V_2O_5 distribuídos ao longo da vida útil de 9 anos da mina
Fontes: *USGS*, *IEA*, Estudos para o PNM 2050, Relatórios das empresas

6.4.10 Lítio metálico

Projeções do **PNM** apontam para crescimento acelerado até 2030, com estabilização da produção a partir de 2040, **convergindo para o *lower range* no longo prazo (*CAGR* de 4,9%** no período 2022-2050)

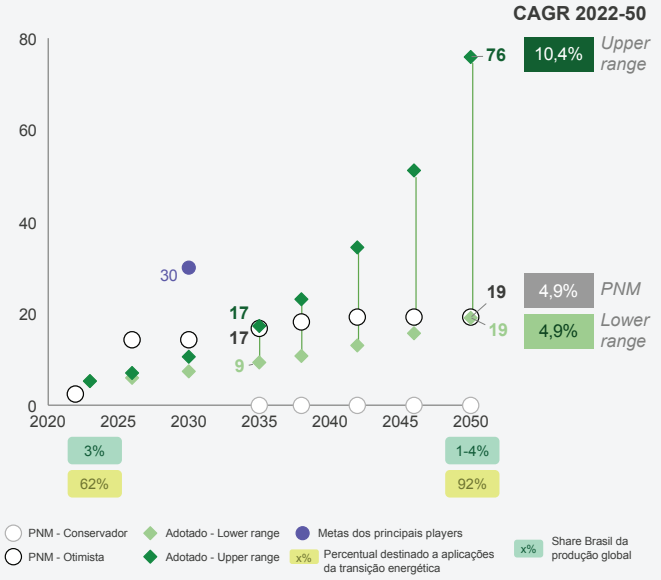
Aplicação do ***CAGR* de 10,4% da *IEA*** para demanda em transição energética resulta em um cenário significativamente mais **otimista**, com produção atingindo 76 kton

Cenário ***Announced Pledges*** da *IEA* indica ***CAGR* de 8,1%** para a demanda global, **dentro do intervalo projetado**

Projetos de expansão dos principais *players* indicam produção de **~30 kton de lítio metálico até 2030**, volume significativamente mais agressivo que projeções adotadas

- **Sigma Lithium:** projeções para 2030 não disponíveis – foi adotada projeção de 770 kton de espodumênio para 2027 (equivalente a ~20 kton de Li[1])
- **AMG:** projeções para 2030 não disponíveis – foi adotada capacidade atual de 130 kton de espodumênio (~3,3 kton de Li[1])
- **Atlas Lithium:** projeções para 2030 não disponíveis – foi adotada meta de ultrapassar 150 kton ao ano de espodumênio em 2025 (~3,8 kton de Li[1])
- **CBL:** com produção anual de 1,5 kton LCE, somadas a 42 kton de concentrado de espodumênio (~2,7kton de Li[1]), anunciou investimentos para duplicar sua capacidade até 2030

Produção brasileira de lítio metálico (Li) (kton contidas, 2022-2050)



1. Considerando 5,5% de Li_2O no espodumênio concentrado, 19% de lítio metálico no Li_2CO_3 (ou LCE) e 47% de lítio metálico no Li_2O
Fontes: *USGS*, *IEA*, Estudos para o PNM 2050, Relatórios das empresas, Brasil Mineral

6.4.11 Lítio

Projeções do **PNM** apontam para crescimento acelerado até 2030, com estabilização da produção a partir de 2040, **convergindo para o *lower range* no longo prazo (*CAGR* de 4,9% no período 2022-2050)**

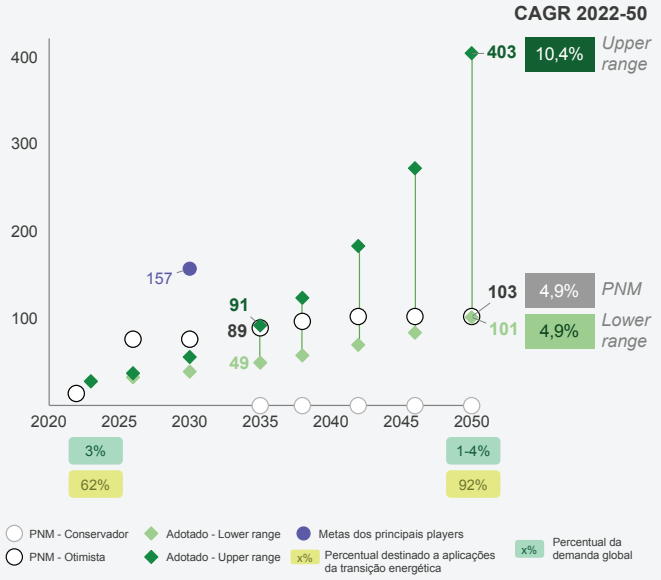
Aplicação do ***CAGR* de 10,4% da *IEA*** para demanda em transição energética resulta em um cenário significativamente mais **otimista**, com produção atingindo 76 kton

Cenário ***Announced Pledges*** da *IEA* indica ***CAGR* de 8,1%** para a demanda global, **dentro do intervalo projetado**

Projetos de expansão dos principais *players* indicam produção de **~157 kton de LCE até 2030**, volume significativamente mais agressivo que projeções adotadas[1]

- **Sigma Lithium:** projeções para 2030 não disponíveis – foi adotada projeção de 770 kton de espodumênio para 2027 (equivalente a ~105 kton de LCE)
- **AMG:** projeções para 2030 não disponíveis – foi adotada capacidade atual de 130 kton de espodumênio (~18 kton de LCE)
- **Atlas Lithium:** projeções para 2030 não disponíveis – foi adotada meta de ultrapassar 150 kton ao ano de espodumênio em 2025 (~20 kton de LCE)
- **CBL:** com produção anual de 1,5 kton LCE, somadas a 42 kton de concentrado de espodumênio (~14kton de LCE no total), anunciou investimentos para duplicar sua capacidade até 2030

Produção brasileira de lítio (LCE) (kton contidas, 2022-2050)



1. Considerando 5,5% de Li_2O no espodumênio concentrado, 19% de lítio metálico no Li_2CO_3 (ou LCE) e 47% de lítio metálico no Li_2O
Fontes: *USGS*, *IEA*, Estudos para o PNM 2050, Relatórios das empresas, Brasil Mineral

6.4.12 Tántalo

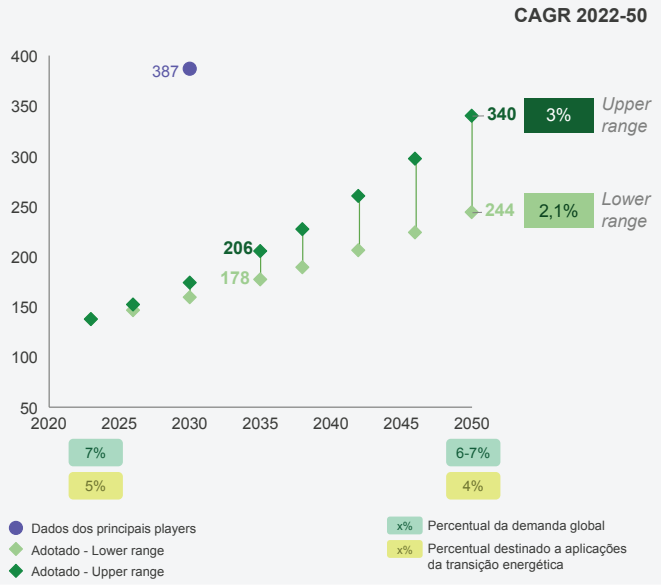
Em todos os cenários, IEA indica ***CAGR* de 3,0%** para a demanda global, adotado como ***upper range*** do intervalo

No cenário ***Net Zero*** da *IEA*, projeção da demanda para transição energética apresenta *CAGR* de **2,1%**, utilizado como parâmetro para o ***lower range*** da estimativa

Dados disponíveis de empresas produtoras indicam volume de **~387 ton de tântalo até 2030**

- **Taboca:** foi considerado potencial de aumento de produção de 160 para 320 toneladas por ano de tântalo metálico até 2030
- **AMG:** foi considerada capacidade divulgada de 600.000 lbs de concentrado de tântalo (equivalente a ~67 ton de tântalo metálico[1])

Produção brasileira de tântalo (kton contidas, 2022-2050)



Nota: PNM parte de produção de 380 kton de minério de tântalo em 2022 (equivalente a 37~100 kton de tântalo metálico, a depender do teor de Ta_2O_5), muito distante da ordem de grandeza divulgada pelo *USGS* e pelos atuais *players* **1.** Considerando teor médio de 30% de Ta_2O_5 no concentrado e proporção de 82% de Ta metálico no óxido. **Fontes:** *USGS*, *IEA*, Estudos para o PNM 2050, Relatórios das empresas

6.4.13 Terras raras

Projetos anunciados somam produção total de **~1,4 kton de terras raras até 2030**

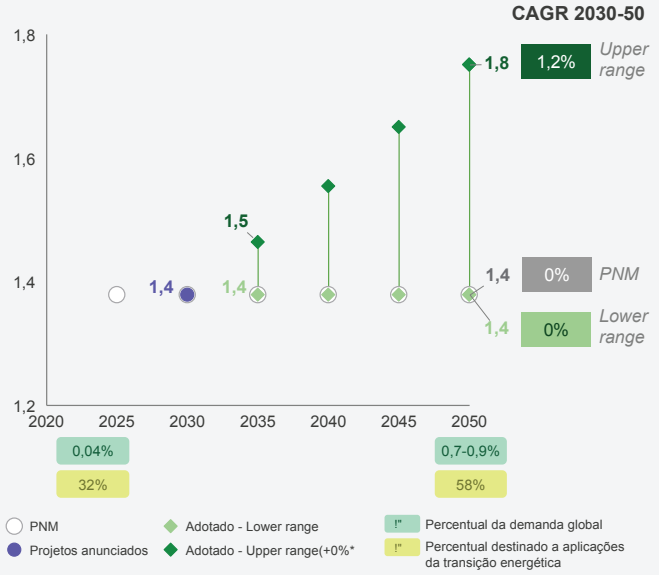
- **Mineração Serra Verde:** iniciou sua produção comercial em 2024 e planeja chegar a ~0,86 kton de terras raras[1] (Nd, Pr, Dy, Tb) ao ano em 20302
- **Meteoric Resources (projeto Caldeira):** projeção para 2030 não disponível – foi adotada capacidade divulgada de ~0,52 kton3 de terras raras1 (Nd, Pr, Dy, Tb) ao ano

Dado o baixo volume da produção atual e os projetos anunciados, definição do ***upper range*** considerou:

- Como ponto de partida, o somatório dos volumes previstos nos **projetos anunciados** (até 2030)
- Para 2050, uma projeção baseada no ***CAGR* da demanda relacionada à transição energética** no período 2030–2050 (**1,2%**)

Projeção do PNM **não prevê crescimento** da produção de 2025 a 2050, adotada como ***lower range* no longo prazo**

Produção brasileira de terras raras (kton contidas, 2022-2050)



Nota: Neste estudo, consideram-se os mesmos metais que as projeções *IEA*: praseodímio (Pr), neodímio (Nd), térbio (Tb) e disprósio (Dy), correspondentes a ~85% do valor de mercado do óxido de terras raras **1.** Considerando óxido de terras raras com a seguinte composição: 13,2% Nd2O3, 4,4% Pr6O11, 1,9% Dy2O3, 0,6% Tb4O7 **2.** Projeção de produção divulgada de 10 kton de óxido de terras raras **3.** Projeção de produção divulgada de 6 kton de óxido de terras raras. **Fontes:** *USGS*, *IEA*, Estudos para o PNM 2050, Relatórios das empresas

6.4.14 Cobalto

Projetos anunciados somam produção total de **~7,9 kton de cobalto**

- **Atlantic Nickel:** projeções não disponíveis – foi adotada produção atual de 0,25 kton ao ano
- **Horizonte Minerals PLC (Projeto Vermelho):** início da operação previsto para 2027, com o objetivo de atingir 1,3 kton
- **Brazilian Nickel (Piauí Níquel Metais):** primeira produção prevista para 2028, com o objetivo de atingir 0,9 kton de cobalto
- **Minmetals (Projeto Jacaré):** produção estimada pela Anglo American em 5,4 kton/ano[1]

Dado o baixo volume da produção atual e os projetos anunciados, definição do ***upper range*** considerou:

- Como ponto de partida, o somatório dos volumes previstos nos **projetos anunciados** (até 2035)
- Para 2050, uma projeção baseada no ***CAGR* da demanda relacionada à transição energética** no período 2035–2050 (**0,4%**)

PNM apresenta **crescimento acelerado até 2030 e *CAGR* de 2,4%** até 2050, adotado como ***lower range* no longo prazo**

Produção brasileira de cobalto (kton contidas, 2022-2050)



1. Cronograma não disponível, portanto, foi adotado início da produção em 2035
Fontes: *USGS*, *IEA*, Estudos para o PNM 2050, Relatórios das empresas