

# Série Estudos e Documentos

## **Transição energética e dependência por minerais críticos: aspectos geopolíticos, socioambientais e a perspectiva brasileira**

**Fernando Ferreira de Castro  
Geraldo Sandoval Góes  
Carlos Cesar Peiter  
Guilherme Sandoval Góes  
Fábio Giusti de Britto  
Maria Pereira Lima Green  
Felipe Soter de Mariz e Miranda**



## **SÉRIE ESTUDOS E DOCUMENTOS**

**Transição energética e dependência por minerais críticos: aspectos geopolíticos, socioambientais e a perspectiva brasileira**

## **PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA**

**Jair Messias Bolsonaro**

Presidente

## **MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES**

**Paulo Cesar Rezende de Carvalho Alvim**

Ministro de Estado

**Sergio Freitas de Almeida**

Secretário Executivo

**Alex Fabiano Ribeiro de Magalhães**

Subsecretário de Unidades Vinculadas – SUV

**Cesar Augusto Rodrigues do Carmo**

Coordenador-Geral de Unidades de Pesquisa e Organizações Sociais – CGPS

## **CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL**

**Silvia Cristina Alves França**

Diretora

**Marcelo Peres Lopes**

Coordenador Substituto de Administração - COADM

**Andréa Camardella de Lima Rizzo**

Coordenadora de Planejamento, Gestão e Inovação - COPGI

**Paulo Fernando Almeida Braga**

Coordenador de Processamento e Tecnologias Minerais - COPTM

**Marisa Nascimento**

Coordenadora de Processos Metalúrgicos e Ambientais - COPMA

**Leonardo Luiz Lyrio da Silveira**

Coordenador de Rochas Ornamentais - CORON

**Arnaldo Alcover Neto**

Coordenador de Análises Minerais - COAMI

# SÉRIE ESTUDOS E DOCUMENTOS

ISSN 0103-6319

SED - 111

## **Transição energética e dependência por minerais críticos: aspectos geopolíticos, socioambientais e a perspectiva brasileira**

### **Fernando Ferreira de Castro**

Psicossociólogo, M.Sc. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Pesquisador PCI do CETEM/MCTI.

### **Geraldo Sandoval Góes**

Engenheiro Eletrônico, PhD em Economia pela Universidade de Brasília (UnB). Pesquisador no IPEA/ME.

### **Carlos Cesar Peiter**

Engenheiro Metalúrgico, D.Sc. em Engenharia Mineral, Pesquisador colaborador do CETEM/MCTI.

### **Guilherme Sandoval Góes**

Pós-Doutor pela UNIFA, Doutor e Mestre em Direito pela UERJ, Vice-Coordenador do Programa de Mestrado da Escola Superior de Guerra ESG/MD.

### **Fábio Giusti de Britto**

Geógrafo, D.Sc. em Engenharia Civil pela COPPE/UFRJ Pesquisador do CETEM/MCTI.

### **Maria Pereira Lima Green**

Geógrafa, M.Sc. pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Pesquisadora PCI do CETEM/MCTI.

### **Felipe Soter de Mariz e Miranda**

Geógrafo, D.Sc. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Pesquisador PCI do CETEM/MCTI.

**CETEM/MCTI**

2022

# SÉRIE ESTUDOS E DOCUMENTOS

**Ana Maria Botelho M. da Cunha**

Editora

## CONSELHO EDITORIAL

Francisco R.C. Fernandes (CETEM), Gilson Ezequiel Ferreira (CETEM), Alfredo Ruy Barbosa (consultor), Gilberto Dias Calaes (ConDet), José Mário Coelho (CPRM), Rupen Adamian (UFRJ).

A Série Estudos e Documentos publica trabalhos que busquem divulgar estudos econômicos, sociais, jurídicos e de gestão e planejamento em C&T, envolvendo aspectos tecnológicos e/ou científicos relacionados à área minerometalúrgica.

O conteúdo desse trabalho é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es).

**Valéria Cristina de Souza**

Coordenação Editorial

Editoração Eletrônica

**André Luiz Costa Alves**

Capa

## CIP – Catalogação na Publicação

T772

Transição energética e dependência por minerais críticos: aspectos geopolíticos e socioambientais / Fernando Ferreira de Castro [et al.]. – Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2022.  
62 p. – (Série Estudos e Documentos; 111).

ISBN 978-65-5919-041-6.

1. Transição energética. 2. Energias renováveis. 3. Minerais críticos. 4. Minerais estratégicos. 5. Conflitos socioambientais – Brasil. I. Castro, Fernando Ferreira de. II. Góes, Geraldo Sandoval. III. Peiter, Carlos Cesar. IV. Góes, Guilherme Sandoval. V. Britto, Fabio Giusti de. VI. Green, Maria Pereira Lima. VII. Miranda, Felipe Soter de Mariz. VIII. Centro de Tecnologia Mineral. IX. Série.

CDD 333.790981

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do CETEM/MCTI  
Bibliotecário(a) Rosana Silva de Oliveira CRB7 – 5849

## **SUMÁRIO**

<b>RESUMO</b>	<b>7</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>8</b>
<b>1   INTRODUÇÃO</b>	<b>9</b>
<b>2   ASPECTOS GEOPOLÍTICOS DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA PARA FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS</b>	<b>12</b>
<b>3   DOS COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS ÀS ENERGIAS RENOVÁVEIS: DESAFIOS GEOPOLÍTICOS DA TRANSIÇÃO DO SISTEMA ENERGÉTICO</b>	<b>16</b>
<b>4   OS MINERAIS CRÍTICOS PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA: AS ENERGIAS LIMPAS E SUA DEPENDÊNCIA POR MATÉRIAS-PRIMAS MINERAIS NÃO-RENOVÁVEIS</b>	<b>20</b>
<b>5   DESAFIOS E ALTERNATIVAS POR VIR: AS IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS E SOCIAIS RELACIONADAS À TRANSIÇÃO ENERGÉTICA PARA FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS</b>	<b>30</b>
<b>6   ASPECTOS LEGAIS E SOCIOAMBIENTAIS EM RELAÇÃO A POLÍTICA DE PROMOÇÃO DOS MINERAIS ESTRATÉGICOS BRASILEIROS</b>	<b>37</b>
<b>7   CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>51</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>53</b>



## **RESUMO**

As recentes transformações e inovações tecnológicas no setor energético vêm sendo impulsionadas pela premência das respostas que se fazem necessárias para conter a mudança climática em nível global, sobre a qual governos e corporações se comprometem no alcance de metas e alterações nos protocolos dos sistemas produtivos para reduzir suas emissões, firmando um alinhamento com os pactos anualmente atualizados desde o Acordo de Paris (2016). Entre as principais iniciativas para o alcance dessas metas vem sendo difundida a proposta de transição dos sistemas energéticos para as denominadas fontes de energia renováveis, que emergem como alternativas sustentáveis, que na atualidade são tecnologicamente viáveis e economicamente atraentes para os países, empresas e pessoas. Estas fontes consideradas limpas, no entanto, dependem de um incremento na produção mineral de matérias-primas que vêm sendo consideradas críticas por sua rigidez locacional e risco de suprimento, posto que estes materiais estão presentes em componentes e equipamentos de geração, armazenamento, transmissão e mobilidade elétrica. Além disso, o processo de transição dos tradicionais sistemas de alto-carbono para sistemas de baixo-carbono tende a gerar impactos nas cadeias produtivas e na infraestrutura instalada, que apresenta diferentes níveis de dependência e de riscos associados às mudanças na matriz tradicional dependente de combustíveis fósseis. O objetivo deste ensaio é discutir os aspectos mais ressaltados neste cenário de dependência de minerais críticos para a transição energética, a fim de apresentar os elementos mais relevantes para o entendimento da geopolítica da energia no século XXI e o panorama da política brasileira de estímulo a produção de minerais estratégicos.

### **Palavras-chave**

Transição energética; energias renováveis; minerais críticos; minerais estratégicos; conflitos socioambientais; Brasil.

## **ABSTRACT**

Recent technological transformations and innovations in the energy sector have been driven by the urgency of the responses that are necessary to face climate change and global warming, on which governments and corporations are committed to achieving goals and change its protocols of production systems to reduce emissions, aligning themselves with the goals annually updated since the Paris Agreement (2016). Among the main initiatives to reach these goals, the proposal of transition from traditional energy systems to the so-called renewable energy sources has been disseminated, which emerge as sustainable alternatives, which are technologically viable and economically attractive for countries, companies and people. These sources are considered "clean", however, depend on a substantial increase in mining production of raw materials that have been considered critical due to their locational rigidity and supply risk, since these are input for materials needed in components and equipment for generation, storage and electric mobility. In addition, the transition process from traditional high-carbon systems to low-carbon systems tends to generate impacts on production chains and its installed infrastructure, which present different levels of dependence and risks associated with changes in the traditional fuel-dependent matrix. fossils. The objective of this essay is to discuss the most highlighted aspects in this scenario of dependence on critical minerals for the energy transition, in order to present the key elements for understanding the geopolitics of energy in the 21st century and the panorama of the Brazilian policy to stimulate the production of strategic minerals.

### **Keywords**

Energy transition; renewable energies; critical minerals; strategic minerals, socioenvironmental conflicts; Brazil.

## 1 | INTRODUÇÃO

As recentes transformações e inovações tecnológicas evidenciam como a produção mineral é um dos motores da reconfiguração energética mundial, que vem sendo intitulada transição energética, cujo eixo dominante é o processo de mudança das fontes de energia de base fóssil para fontes de energia renovável.

A garantia do suprimento energético e da produção mineral são peças fundamentais para a prosperidade econômica, pois os fornecimentos de energia e de matérias-primas minerais estão no cerne das cadeias produtivas e nas relações entre os países. Mas as fontes de energia que impulsionam as economias mundiais vêm sofrendo rápidas transformações, principalmente no tocante as denominadas fontes renováveis de energia que atualmente são tecnologicamente viáveis, economicamente atraentes e se caracterizam como uma alternativa sustentável para os países, empresas e pessoas.

As tecnologias de geração de energia por fontes limpas diferem profundamente daquelas que dependem das tradicionais fontes por hidrocarbonetos e combustíveis fósseis (BLONDEEL *et al.* 2021). No processo de transição para as energias limpas é vital o suprimento de uma variedade de recursos minerais (IEA, 2021), entre os quais alguns vêm sendo considerados críticos por diversos fatores, tais como: a limitação de localização das reservas em produção a determinados locais com potenciais instabilidades no fornecimento; conflitos relacionados às realidades locais nas comunidades onde se inserem; e também por questões tecnológicas, uma vez que em alguns casos não é possível a sua imediata substituição por outros materiais (EC, 2020a; IRTC, 2020).

Certos bens minerais são fundamentais para a construção dos componentes de captação, armazenamento e transmissão de energia renovável, portanto, caracterizam-se como elementos-chave para o desenvolvimento e manutenção de cadeias produtivas de baixo carbono (IEA, 2020). A transição energética para fontes limpas é uma proposta que está em alinhamento com o alcance das metas, que vem sendo pactuadas desde o Acordo de Paris (2016) e visam reduzir os efeitos da mudança climática através da redução nas emissões de CO<sub>2</sub> e outros gases, tornando-se um dos marcos recente para a geopolítica da energia no século XXI (FMI, 2021; IEA, 2021; IRTC, 2020; OECD, 2019; IPCC, 2018).

Contudo, esta nova matriz energética que está emergindo poderá estabelecer consequências negativas para os sistemas de geração de energia instalados, portanto, deve-se buscar um processo equilibrado para a transição energética, conforme será discutido adiante. Além disso, o aumento da demanda pela extração de determinados minerais para esta transição perpassa desafios ambientais, sociais e políticos nos territórios mineradores.

O objetivo deste artigo é abordar essa situação de transição através da apresentação de alguns dos avanços na pesquisa científica relacionados a fontes renováveis, na interface com a questão do aumento da demanda por recursos minerais. Com base em uma extensa revisão bibliográfica sobre o tema, serão apresentados alguns elementos chave deste debate que vem ampliando sua relevância a nível mundial.

Além desta breve introdução, o artigo está organizado em seis seções, que abordam: as questões geopolíticas implicadas com a transição do sistema energético (seção 2), os desafios da

transição dos combustíveis fósseis às energias renováveis (seção 3), uma breve discussão sobre as energias limpas e sua dependência por matérias-primas minerais não-renováveis (seção 4), as implicações ambientais e sociais relacionadas a transição energética para fontes de energia renováveis (seção 5), aspectos legais e socioambientais dos minerais estratégicos brasileiros (seção 6), e, por fim, a última seção com as considerações finais.

## 2 | ASPECTOS GEOPOLÍTICOS DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA PARA FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS

Com efeito, resta indubitável que a transição para fontes de energia com baixa emissão de carbono já projeta a imagem de ganhadores e perdedores geopolíticos dentro do contexto mundial da Era Pós-Covid. Como bem ponderam (PEITER, CASTRO e GÓES, 2021), a crescente tensão ocasionada pela concentração geográfica de algumas matérias-primas vitais para as novas tecnologias tem acirrado disputas geopolíticas que tendem a se acelerar no século XXI, evidenciando a posição dominante adquirida pela República Popular da China.

Tais disputas surgem no âmbito da tensão geopolítica entre o expansionismo mackinderiano chinês e a contenção spykmaniana norte-americana<sup>1</sup>, que coloca, de um lado, a tentativa de manutenção da hegemonia estadunidense (pax americana) e, do outro, a busca pelo sistema multipolar de poder global, notadamente a partir da ascensão da China e do reposicionamento russo. Nesse contexto mundial ainda em construção, a dinâmica da geopolítica da energia também se acelera, na medida em que é compelida a incorporar, na sua equação tecnológica, novas variáveis até então desconsideradas, como, por exemplo, as ameaças e as oportunidades promovidas pela necessidade dos minerais destinados às suas cadeias produtivas.

---

<sup>1</sup> A ideia de expansionismo mackinderiano chinês significa que a iniciativa da nova rota da seda tem por base a teoria do poder terrestre de Mackinder. Por outro lado, a ideia de contenção spykmaniana norte-americana significa que a estratégia dos Estados Unidos deve ser pautada na teoria das fímbrias de Spykman.

Cabe, portanto, buscar compreender a complexidade da nova ordem energética mundial, que se desenvolve dentro de um arquétipo que mescla os impactos da descarbonização da economia nas cadeias de produção global, os desafios tecnológicos do aquecimento global antropogênico e o jogo geopolítico das grandes potências globais e seus interesses em conflito. Dessarte, o estudioso da geopolítica da energia do Século XXI tem a tarefa de desvelar a complexidade dessa era pós-moderna, que se alimenta de uma visão antagônica que coloca em contato direto a transição da ordem energética mundial (dos combustíveis fósseis para os combustíveis verdes) e a transição da ordem geopolítica mundial (da unipolaridade da pax americana para a multipolaridade de escopo global).

Impende, pois, num primeiro momento, examinar os desafios geopolíticos da transição do sistema energético mundial, ou seja, analisar as implicações geopolíticas do poder global advindas da substituição dos combustíveis fósseis pelas energias renováveis, cujo desfecho indicará os grandes ganhadores e os grandes perdedores na nova ordem mundial. Isto significa dizer que a nova ordem energética mundial moldará a nova ordem geopolítica mundial.

Em termos simples, os ganhadores da transição energética indicarão se os Estados Unidos terão musculatura geopolítica para resgatar o arquétipo hegemônico da pax americana, ou, ao contrário, se a ascensão geopolítica de novas potências globais (China, Rússia e Índia) comandará a transição para a

ordem mundial multipolar. É, portanto, com tal espírito crítico de investigação que urge compreender e analisar a transição energética, notadamente a matriz dos minerais críticos<sup>2</sup>.

Assim, o presente artigo tem a expectativa de possibilitar a fluência de ideias contra e a favor, resultando daí um maior esclarecimento sobre essa temática, complexa e inacabada, mas que representa a pedra angular da geopolítica mundial contemporânea, fruto, como dito, da reconfiguração da “nova ordem energética”. Para a compreensão deste contexto de “dupla transição: energética e geopolítica” é fundamental analisar as ameaças e as oportunidades que se apresentam para o desenvolvimento do Brasil nesse novo cenário. Em essência, o objetivo central desse trabalho é analisar a transição energética dos minerais críticos no século XXI e o papel geopolítico no Brasil neste mundo em transição para a economia de baixo carbono.

Esta complexa questão está cada vez mais em voga e deverá ser enfrentada pelo estrategista do século XXI. Nesse diapasão, na esteira acadêmica de Góes (2021, p. XXIII), cabe lembrar a importante posição do Brasil neste contexto, que “partindo da ideia de que o imperativo categórico da geopolítica brasileira é conduzir o País a estar entre as cinco maiores

---

<sup>2</sup> Nesse sentido, doutrinadores há que entendem que a sociedade internacional caminha na direção da multipolaridade a partir da ascensão geopolítica das potências emergentes (China, Rússia, Índia, Brasil e África do Sul), cuja atuação internacional viabiliza a criação de estruturas anti-hegemônicas de poder global, tais como BRICS em contraposição à pax americana; G-20 das Finanças Internacionais em tensão com o G-7 (Banco dos Países Desenvolvidos dos EUA, Europa e Japão), Banco Asiático e Banco dos BRICS em mitigação da influência mundial do FMI e Banco Mundial, enfraquecimento do dólar americano como referência do sistema financeiro internacional, paralisação da Rodada de Doha de negociação no âmbito da OMC em virtude da atuação do Grupo dos Vintes do comércio mundial e muitas outras iniciativas anticíclicas de poder hegemônico.

potências do planeta, urge ao estrategista brasileiro articular os elementos do Poder Nacional a partir dos seus três grandes arquétipos geopolíticos fundantes”, que posicionam o Brasil como potência energética, potência alimentar e potência ambiental (potência verde).

Por conseguinte, prevê-se que o posicionamento brasileiro no cenário mundial perpassa necessariamente pelas fontes consideradas limpas, cujo aproveitamento depende de um incremento na produção mineral de matérias-primas que vêm sendo consideradas críticas por sua rigidez locacional e risco de suprimento, assim como por sua importância econômica posto que estes materiais são insumos presentes em componentes e equipamentos de geração, armazenamento, transmissão, mobilidade elétrica e nas Tecnologias da Informação e Comunicação.

Além disso, o processo de transição dos tradicionais sistemas de alto-carbono para sistemas de baixo-carbono tende a gerar impactos nas cadeias produtivas globais e na infraestrutura instalada a nível planetário. É por isso que se pretende desvelar os aspectos mais emblemáticos desta discussão, com base em extensa revisão bibliográfica de artigos científicos e estudos governamentais recentes, a fim de apresentar os elementos chave deste debate para o entendimento da geopolítica da energia no século XXI, bem como o papel a ser desempenhado pelo Brasil nesse cenário.

### **3 | DOS COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS ÀS ENERGIAS RENOVÁVEIS: DESAFIOS GEOPOLÍTICOS DA TRANSIÇÃO DO SISTEMA ENERGÉTICO**

Até meados dos anos 2000, a questão da transição energética estava envolta por tensões sobre a possível escassez e consequente aumento nos preços de venda do petróleo (HIRSCH *et al.* 2005), contudo este cenário se remodelou rapidamente, e hodiernamente vivenciamos um período de relativa abundância de combustíveis fósseis (KLARE, 2012). Isto foi possível pelos avanços no desenvolvimento de novas tecnologias, como a utilização do xisto (BLACKWILL & O'SULLIVAN, 2012) e o fraturamento hidráulico (GRIGAS, 2017), e a exploração-produção em grandes profundezas entre outras tecnologias inovadoras que permitirão novas possibilidades de extração de combustíveis líquidos e gasosos, como o exemplo do pré-sal brasileiro em plataformas continentais, colaborando para o achatamento na variação dos custos e decrescimento na elasticidade do suprimento de óleo e gás (BLONDEEL *et al.* 2021).

Tendo por base as prerrogativas do Acordo de Paris (BRASIL, 2017; ONU, 2016), a redução na utilização de combustíveis fósseis requereria que uma porção significativa dessas reservas não fosse explorada ou consumida. Isso significa que, para o alcance dessas metas, deve-se considerar que o mundo detém um limite finito na utilização do carbono de forma a permanecer dentro das metas pactuadas no Acordo, o que acarreta repensar os padrões de produção e consumo. Entre algumas tratativas propostas no acordo, discute-se a questão da diminuição na produção de petróleo a fim de reduzir suas emissões nos ecossistemas (IEA, 2020; IPCC, 2018).

Esta visão sobre a redução na produção de óleo e gás vem sendo amplamente utilizada em campanhas, como a *'keep oil in the ground'* (tradução livre: deixe o petróleo no chão), a *'fossil fuel non proliferation treaty'* (tratado de não proliferação de combustíveis fósseis) e as *'anti-fracking movement'* (movimento contra o fraturamento), entre outras. Tais iniciativas questionam o aumento recente na prospecção e consumo de combustíveis fósseis, o que retardaria o processo de transição energética para fontes renováveis. Reforçando esta ideia, um estudo recente (WELSBY *et al.* 2021) aponta que a maior parte das reservas de combustíveis fósseis deve permanecer no solo para uma chance concreta de alcance destas metas, que visam a estabilização do aquecimento global abaixo de 1,5°C (IPCC, 2018), entre as quais estimou-se que: 85% do carvão, 58% do petróleo e 59% do gás natural devem ser resguardados.

Mas esta transição, que também vem sendo chamada de transição das fontes energéticas de alto carbono para fontes de baixo carbono, não é tão direta ou facilmente alcançável, sendo perpassada por complexas questões políticas e econômicas, que envolvem o aumento nos custos de produção e consumo, além de diferentes níveis de riscos sociais e ambientais. A dimensão do sistema de produção tradicional, que tem em sua matriz a utilização de combustíveis fósseis, está sujeita a gerar dependência por sua continuidade, devido aos arranjos institucionais e a infraestrutura instalada. Neste sentido, a indústria de óleo e gás tende a buscar suas alternativas para evitar o colapso na demanda, assim como ocorreu com a indústria do carvão (IEA, 2020).

Embora sejam evidentes inúmeros benefícios para a utilização de tecnologias de baixo carbono (HERTWICH *et al.* 2015), esta questão conduziu, por parte de alguns autores, à discussão do

chamado “paradoxo verde”, como sendo um efeito gerado pelo aumento na oferta em antecipação a futura redução na demanda por combustíveis fósseis, consequência da transição das tecnologias de alto-carbono para as de baixo-carbono (SINN, 2012). Os países produtores de petróleo ao aumentarem sua produção, buscando a sua inserção nos mercados que ainda restam para este setor, tendem a produzir o chamado paradoxo verde que se refere à tendência de aceleração nas emissões e, portanto, atraso na transição energética para fontes limpas (BLONDEEL *et al.* 2021). Isto ocorre em consequência das estratégias dos grandes produtores, em especial os países produtores de petróleo de “baixo custo” no Oriente Médio, na busca de conter o risco de perda de demanda do setor de P&G. Além disso, os países que são notadamente produtores de óleo e gás também tendem a serem grandes emissores de CO<sub>2</sub> porque o consumo destes combustíveis está implícito nos seus sistemas energéticos nacionais (FATTOUH, 2021).

Tendo em vista os efeitos sobrepostos desta dinâmica geopolítica emergente sobre os países produtores, questiona-se quem são os “ganhadores” e “perdedores” nesta transição energética, ou seja, quais países estão aptos a migrar de sistema e “não irão queimar seu petróleo” e quais países elevarão suas produções e emissões em consequência disso. As economias emergentes produtoras de petróleo tendem assim a extrair mais e por um período maior do que as economias mais avançadas, enquanto os países da OECD, como Estados Unidos, Canadá e Noruega possuem capacidades financeiras para absorver as consequências dessa transição (LE BILLION & KRISTOFFERSEN, 2020; ARMSTRONG, 2020).

Ainda neste contexto, deve-se mencionar que na Conferência-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança Climática de 2021 (COP26), que foi realizada em Glasgow, na Escócia, mais de 200 países estabeleceram em documento oficial inúmeros compromissos e consensos, entretanto, o próprio chefe-geral da ONU, outras entidades relacionadas e diversos veículos de imprensa internacional apontam que não é o bastante para frear o aquecimento global e alcançar um patamar abaixo do limite de 1,5°C (UN, 2021; UNEP, 2021; SCHRAER & DEVLIN, 2021; MUFSON & TIMSIT, 2021). Considera-se que a Conferência não foi bem sucedida porque não foram claramente firmados acordos para o alcance de metas, ou seja, as estratégias a serem realizadas pelos países para uma aceleração de iniciativas que visam a redução do uso de combustíveis fósseis não endereçam uma resposta firme para a mudança climática.

Portanto, a transição energética para fontes de baixo carbono envolve também a necessidade de se pensar mecanismos justos para a transição da matriz de alto-carbono, tendo em vista as consequências para os países possivelmente afetados, seus cidadãos, trabalhadores e *shareholders*, que sofrerão impactos socioeconômicos e são dependentes do compartilhamento das novas tecnologias das quais os países industrializados são os detentores. Neste contexto, embriado à questão da necessidade de compartilhamento de tecnologias e investimentos em ciência & tecnologia nos países em desenvolvimento, surge a questão da importância dos minerais críticos e estratégicos que serão a base das tecnologias envolvidas na geração de energia de baixo carbono, tratada na seção a seguir.

#### **4 | OS MINERAIS CRÍTICOS PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA: AS ENERGIAS LIMPAS E SUA DEPENDÊNCIA POR MATÉRIAS-PRIMAS MINERAIS NÃO-RENOVÁVEIS**

A maioria das tecnologias de geração de energia renovável continuarão sendo intensivas no uso de metais, pois as iniciativas de descarbonização dos sistemas energéticos implicam em um aumento na demanda de diversos metais que já possuem elevada escala de produção e também de materiais considerados críticos, com produção mais restrita. Portanto, a mineração, a transformação mineral e a indústria da reciclagem de materiais estão cada vez mais conectadas ao setor de energia na medida em que aumenta a participação das energias renováveis na matriz energética dos países (TOKIMATSU *et al.* 2017).

Algumas matérias-primas minerais detêm importância econômica, social e de segurança nacional porque tanto a sua crescente demanda, em aplicações de alto valor agregado, quanto seu risco de escassez ou suprimento, vem orientando estratégias políticas e comerciais entre os países a fim de garantir a manutenção de seus setores produtivos essenciais e estratégicos, sendo, portanto, denominadas por estes e outros fatores como matérias-primas críticas (CASTRO *et al.* 2021; PEITER *et al.* 2021).

No tocante a questão da transição energética para limitar os efeitos adversos da mudança climática, os países e as corporações vêm elevando suas metas para cumprir a redução das emissões de dióxido de carbono que, em consequência, aumentará substancialmente a demanda de suprimento por metais como ferro, aço-ligas, cobre, níquel, cobalto, lítio e elementos de terras raras, que são as principais matérias-

primas envolvidas na construção de componentes e equipamentos ligados a essa transição energética (WORLD BANK, 2017). Portanto, a transição energética para fontes renováveis vai requerer um grande incremento na produção desses minerais considerados críticos (EC, 2020a; LEE *et al.* 2020; WATARI *et al.* 2019).

Neste cenário, o setor de mineração tende a se tornar um dos setores em rápida expansão tanto no presente quanto no futuro (IEA, 2021; IMF, 2021; WORLD BANK, 2020) e a combinação entre a transição energética e a dependência por minerais vem sendo discutida por muitos especialistas como um indissociável nexos “energia-minerais” (BAITON *et al.* 2021; BLONDEEL *et al.* 2021; NATE *et al.* 2021; LEE *et al.* 2020; KONING, *et al.* 2018; SCHLÖR *et al.* 2018; TOKIMATSU *et al.* 2017; VIDAL *et al.* 2017; MCLELLAN *et al.* 2016; GIURCO *et al.*, 2014; VIDAL *et al.* 2013).

Os gargalos para a expansão das fontes de energia limpa estão diretamente ligados com a cadeia produtiva de componentes e equipamentos, que, por sua vez, depende da prospecção e processamento de certas matérias-primas. Tendo em vista a rigidez locacional de determinadas reservas minerais, tem sido cada vez mais evidente a disputa entre países produtores e/ou fornecedores por estas matérias-primas, assim como dos países que dominam as tecnologias para construção de componentes semiacabados e finais, que exercem influência nas condições para a expansão mundial do setor das tecnologias renováveis.

A construção de painéis fotovoltaicos de geração de energia solar (*Photovoltaic*), geradores de energia eólica, células de combustível (*fuel cells*) para a mobilidade elétrica (*e-mobility*),

motores de tração elétricos (magnetos permanentes), Tecnologias da Informação e Comunicação – TICs (*Information and Communication Technologies - ICT*), robôs, drones, impressoras 3d, entre outras tecnologias emergentes, depende de uma grande variedade de materiais metálicos com distintas disponibilidades de suprimento. O Quadro 1 a seguir ilustra as principais matérias-primas ou materiais que são vitais para a construção das tecnologias mencionadas.

**Quadro 1.** As principais matérias-primas e materiais críticos para a construção das tecnologias estratégicas ligadas a transição energética.

Tecnologias	Matérias-primas e materiais críticos associados
Baterias de íons de lítio (Li-ion)	<b>Matérias-primas:</b> alumínio, cobalto, cobre, estanho, ferro, fluor, fósforo, grafite, lítio, manganês, nióbio, níquel, silício, titânio. <b>Materiais:</b> anodos, catodos e eletrólitos.
Células de combustível (FC – Fuel Cells)	<b>Matérias-primas:</b> alumínio, cálcio, caulim, cobalto, cobalto, cobre, cromo, estrôncio, estrôncio, ferro, grafite, lítio, níquel, paládio, paládio, platina, platina, potássio, prata, ródio, rutênio, silício, sódio, titânio, vanádio, zircônio. <b>Materiais:</b> aço inoxidável, fibras de carbono, grafeno, nitreto de boro e outros.
Turbinas eólicas (geradores síncronos e de indução)	<b>Matérias-primas:</b> alumínio, boro, chumbo, cobre, cromo, disprósio, ferro, manganês, molibdênio, neodímio, nióbio, níquel, praseodímio. <b>Materiais:</b> aço-ligas, fibras de carbono, fibras de vidro, magneto de neodímio e outros.
Motores de tração elétrica (magnetos permanentes)	<b>Matérias-primas:</b> alumínio, boro, cobre, cromo, disprósio, ferro, molibdênio, neodímio, níquel, praseodímio, silício. <b>Materiais:</b> aço-ligas, magneto de neodímio, silício metálico e outros.
Painéis fotovoltaicos (PV)	<b>Matérias-primas:</b> alumínio, boro, cádmio, chumbo, cobre, estanho, ferro, gálio, germânio, índio, molibdênio, níquel, prata, selênio, silício, telúrio, zinco. <b>Materiais:</b> silício policristalino, silício metálico, telureto de cádmio e outros.

**Quadro 1.** As principais matérias-primas e materiais críticos para a construção das tecnologias estratégicas ligadas a transição energética.

continua

<p>Robótica (Robotics)</p>	<p><b>Matérias-primas:</b> alumínio, antimônio, berílio, boro, cobre, cromo, disprósio, estrôncio, ferro, gálio, índio, manganês, metais do grupo platina, molibdênio, neodímio, nióbio, níquel, praseodímio, silício, tântalo, telúrio, terras raras, titânio, tungstênio, vanádio, zinco, zircônio.</p> <p><b>Materiais:</b> aço-ligas, baterias, cerâmicas e vidros especiais, fibras de carbono, liga de níquel-titânio, magnetos, nanotubos, polímeros, semicondutores e outros.</p>
<p>Drones (UAV - <i>Unmanned Aerial Vehicles</i>)</p>	<p><b>Matérias-primas:</b> alumínio, berílio, cobalto, cobre, cromo, escândio, ferro, gálio, germânio, grafite, háfnio, índio, lítio, magnésio, metais do grupo platina, nióbio, níquel, ouro, silício, terras raras, titânio, vanádio.</p> <p><b>Materiais:</b> aços especiais, baterias, fibra de aramida, kevlar, ligas de alumínio, alumínio-magnésio, ferronióbio, níquel-titânio, magnetos, pós metálicos refratários, semicondutores e outros.</p>
<p>Impressoras 3D (3D printing / additive manufacturing)</p>	<p><b>Matérias-primas:</b> alumínio, cobalto, cobre, cromo, escândio, ferro, háfnio, magnésio, manganês, molibdênio, nióbio, níquel, silício, titânio, tungstênio, vanádio, zircônio.</p> <p><b>Materiais:</b> aços inoxidáveis, ligas de alumínio e níquel-titânio, ligas especiais e outros.</p>
<p>Tecnologias de informação e comunicação (ICT)</p>	<p><b>Matérias-primas:</b> boro, chumbo, cobalto, cobre, cromo, estanho, estrôncio, gálio, germânio, grafite, índio, lítio, magnésio, manganês, metais do grupo platina, níquel, ouro, prata, silício, terras raras, titânio, tungstênio.</p> <p><b>Materiais:</b> diversas ligas metálicas, grafeno, magnetos de Neodímio-Ferro-Boro, semicondutores, materiais citados anteriormente e outros.</p>

Fonte: EC (2020a), IRENA (2019), adaptado pelos autores.

A produção de células de baterias de Li-ion se concentra na China, África e América Latina, que são responsáveis por 74% da produção mundial de minerais de lítio. Nas turbinas eólicas, a China detém quase um monopólio da produção de componentes chaves, em especial para disprósio, neodímio,

térbio e praseodímio, nos quais seus produtos finais também dependem de grandes volumes de ferro e aço-ligas a depender de sua aplicação. Nos motores elétricos, que requerem ímãs permanentes e componentes oriundos de elementos de terras-raras, a China também vem elevando sua relevância na produção primária, além de uma política interna considerada protecionista quanto a disponibilidade de suas reservas para o mercado internacional, onde detém 60% do mercado de motores de tração elétrica (EC, 2020a; 2020b). Desta forma, os diferentes setores que envolvem as chamadas tecnologias limpas dependem mais de minerais críticos do que de componentes provenientes de combustíveis fósseis. Considerando as tecnologias associadas aos setores energéticos implicadas na transição para uma economia de baixo carbono, o Quadro 2 apresenta um panorama da dependência destes setores, em três níveis de importância, segundo as principais matérias-primas críticas.

**Quadro 2.** Importância das principais matérias-primas críticas, por tecnologia estratégica para a transição energética.

Substância	Tecnologia / Energia									
	Geotérmica	Hidro	Nuclear	Bioenergia	Rede Elétrica	Solar	Hidrogênio	Eólica	Solar Fotovoltaica	Veículos elétricos
Aço	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
Cobre	Médio	Médio	Médio	Alto	Alto	Médio	Médio	Alto	Alto	Alto
Alumínio	Médio	Médio	Médio	Médio	Alto	Alto	Médio	Médio	Alto	Alto
Níquel	Alto	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Alto	Alto
Zinco	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Alto	Médio	Médio
Disprósio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Alto	Médio	Alto
Neodímio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Alto	Médio	Alto
Praseodímio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Alto	Médio	Alto
Silício	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Alto	Alto
Térbio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Alto	Médio	Alto
Cobalto	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Alto
Grafite	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Alto
Manganês	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Alto
Prata	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Alto	Médio
Cádmio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Alto	Médio
Gálio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Alto	Médio
Iridio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Alto	Médio	Médio	Médio
Lítio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Alto
Platina	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Alto	Médio	Médio	Médio
Telúrio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Alto	Médio
Urânio	Médio	Médio	Alto	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio	Médio

Legenda: Níveis de importância por tipo de tecnologia / energia.



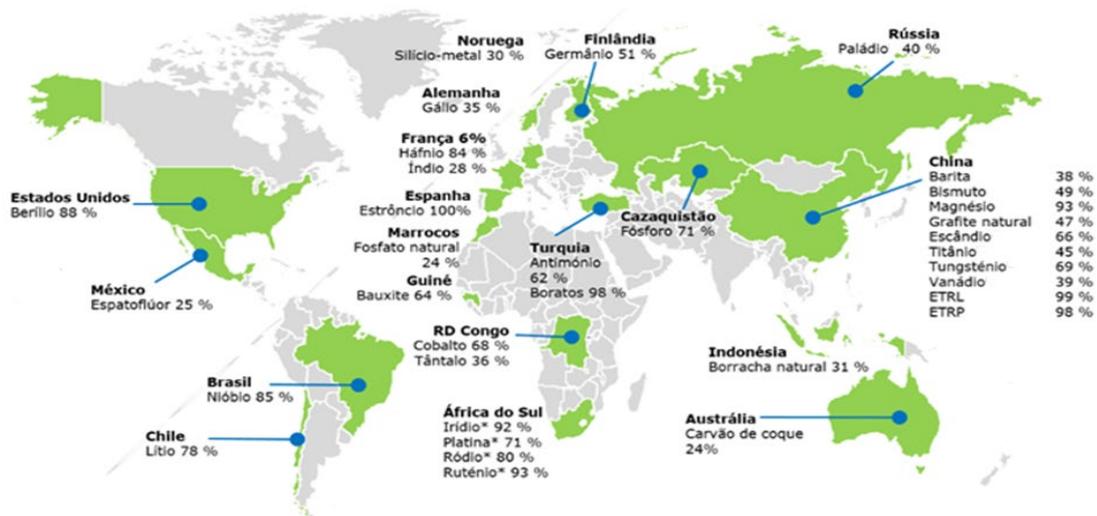
Fonte: EC (2020a), adaptado pelos autores.

Neste cenário de disputa por recursos e a manutenção ou busca por inserção nesses novos mercados, a questão estratégica, no tocante a garantia do suprimento de minerais considerados “críticos” para a transição energética, está ligada a três questões centrais: (i) a questão climática, (ii) a competitividade industrial e a (iii) segurança nacional (NAKANO, 2021; EC, 2020b; IRTC, 2020). Nota-se que a demanda por bens minerais críticos e sua premência para viabilizar uma transição energética para fontes consideradas limpas, depende também de um incremento na produção de determinados metais cuja demanda atual é elevada. Em consequência, este aumento pode gerar um choque nos preços (*demand shock*) de todas as *commodities* (FMI, 2021; OECD, 2021), o que vêm despertando uma nova fronteira para as rivalidades geoeconômicas, tendo em vista o aumento da competitividade industrial na busca por inserção nesses mercados e para garantir a segurança nacional (GIRTAN *et al.* 2021; EC, 2020b).

A garantia de inserção neste mercado vem ganhando contornos de uma questão de segurança nacional para as economias mais desenvolvidas, que se veem ameaçadas diante do domínio da China e outras economias emergentes detentoras de importantes reservas minerais para os países ou blocos consumidores (PEITER, CASTRO & GÓES, 2021). Deve-se observar que esta questão vem sendo considerada uma ameaça à segurança nacional também por conta dos possíveis entraves na obtenção de matérias-primas para a construção de equipamentos de uso militar, tais como: drones, equipamentos bélicos, lasers, radares e sonares avançados, robôs, satélites, entre outros (EC, 2020b; USGS 2017a; USGS, 2017b; Uren, 2019; BARTEKOVA & KEMP, 2016).

Além destas questões, a concentração dos depósitos de minerais críticos, bem como a produção atual e futura, requerem que sejam pensados os riscos sociais e ambientais dessa extração mineral no âmbito local, devido a complexa interação entre dinâmicas econômicas, sociais e a governança destes territórios (OWEN *et al.* 2020). A intensificação das atividades de mineração em determinados países para atender a futura demanda por minerais críticos para a transição energética, especialmente em regiões menos desenvolvidas ou com conflitos pré-existentes, pode acarretar o aumento de conflitos socioambientais a estes relacionados (LÈBRE *et al.* 2020).

Visando mapear essas possíveis ameaças ao suprimento de matérias-primas, a Comissão Europeia (EC), bem como os EUA, Japão e Índia realizam periodicamente estudos sobre a disponibilidade mundial e risco de suprimento de dezenas de matérias-primas minerais visando identificar quais dentre elas devem ser consideradas críticas. A Figura 1 a seguir apresenta um mapa que ilustra os países que concentram as reservas em produção das principais matérias-primas críticas para o bloco europeu.



Fonte: EC (2020), adaptado pelos autores.

**Figura 1.** Concentração da disponibilidade de matérias-primas críticas para a UE por país fornecedor.

Verifica-se no mapa que alguns países detêm porções significativas da produção de inúmeros materiais considerados críticos para a União Europeia, entre os quais se destacam os elementos de terras-raras leves e pesados (ETRL e ETRP, respectivamente), concentrados na China, o lítio no Chile e o nióbio no Brasil (que detém mais de 85% das reservas mundiais em produção). Os estudos de criticalidade das matérias-primas do bloco europeu partem de um extenso levantamento do risco de suprimento desses materiais associado à sua importância econômica para as cadeias produtivas europeias e sua capacidade de substituição, recuperação ou reciclabilidade ao final da vida útil dos produtos (EC, 2018; EC 2017).

Na próxima seção serão discutidos aspectos ambientais e dos conflitos locais decorrentes ou associados à produção de alguns materiais críticos necessários à transição energética.

## **5 | DESAFIOS E ALTERNATIVAS POR VIR: AS IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS E SOCIAIS RELACIONADAS À TRANSIÇÃO ENERGÉTICA PARA FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS**

Os resultados apontados por Watari *et al.* (2019) acerca do total de material requerido para a transição energética, e algumas de suas consequências verificáveis por modelagem, enfatizam que uma redução significativa na utilização de combustíveis fósseis no setor de transporte e energia poderá levar ao aumento de impactos adversos, notadamente ambientais e sociais, nos países fornecedores de recursos minerais de fonte primária.

A mensagem que os autores (op. cit.) trazem acerca do manejo de recursos minerais é que não basta a projeção ou busca por mitigação das incertezas quanto a disponibilidade de minerais para a geração de energia renovável, pois devem ser considerados os impactos associados com a elevação do fluxo de atividade extrativa mineral. Se não forem gerenciados de forma adequada, existem fatores ambientais significativos e impactos sociais relacionados à atividade de mineração e processamento de minerais que contribuirão para o aumento de conflitos nestas esferas (UNDP, 2017).

Entre os exemplos mais frequentemente citados sobre conflitos em territórios produtores ou fornecedores de matérias-primas consideradas críticas (LÈBRE *et al.*, 2020; OWEN *et al.*, 2020), destaca-se o caso da mineração do cobalto na República Democrática do Congo.

A mineração do Cobalto no Congo tem contribuído para o aumento dos conflitos sociais pré-existentes, tais como: o trabalho infantil, a baixa remuneração e a dependência econômica da atividade, e questões ambientais, tais como: o desflorestamento local, a poluição por resíduos de mineração, a erosão e assoreamento, além de emissão de gases e também a contaminação de cursos hídricos pela falta de estratégias preventivas e utilização de tecnologias adequadas. Outros casos relevantes a serem destacados são: a mineração de cobre, matéria-prima necessária para fios elétricos e circuitos, células solares de película fina, bem como também, o caso do lítio, usado em baterias, sobre o qual o governo do Chile vem sendo criticado pelo esgotamento dos recursos hídricos locais em todo o deserto do Atacama, ocasionando agravos ambientais a um ecossistema frágil, e também convertendo prados e lagoas em salinas.

Na China, a extração, moagem, refino e processamento de cádmio, um subproduto da mineração de zinco, em compostos para módulos fotovoltaicos de filme fino que usam telureto de cádmio ou semicondutores de sulfeto de cádmio, pode levar à contaminação do solo agrícola ou subterrâneo, exposição do trabalhador a produtos químicos perigosos (cloreto de cádmio) e poluição do ar (MULVANEY, 2014). Em relação aos minerais de terras raras, como o neodímio, necessário para ímãs em geradores e motores elétricos, veículos elétricos, e também presente nos catalisadores de fluido para fraturamento com gás de xisto, resultaram na poluição química de sulfato de amônio e cloreto de amônio, que agora ameaça os aquíferos subterrâneos rurais e recursos hídricos (BAI *et al.* 2022; STANDAERT, 2019).

Levando-se em consideração alguns desafios ambientais, sociais e políticos associados ao aumento da demanda por recursos minerais segundo os setores estratégicos que podem ser impactados pela transição energética para fontes de energia limpa, a Agência Internacional de Energia (IEA) elaborou o Quadro 3 a seguir, que traça algumas das possíveis consequências a serem observadas neste processo.

**Quadro 3.** Desafios ambientais, sociais e políticos relacionados à demanda por minerais para a transição energética.

<b>Temas</b>	<b>Desafio</b>
<b>Mudança climática</b>	A produção de minerais ligados a transição energética pode ser uma fonte significativa de emissão de gases de efeito estufa à medida que a demanda aumenta, posto que para sua prospecção a intensidade de emissões é mais alta do que a de outros metais.
<b>Uso da terra</b>	A mineração traz grandes mudanças na cobertura do solo que podem ter impactos adversos na biodiversidade e nas comunidades.
<b>Uso da água</b>	A mineração e o processamento mineral requerem grandes volumes de água para suas operações e apresentam riscos de contaminação por meio de drenagem ácida de mina, descarga de águas residuais ou disposição de rejeitos em barragens.
<b>Resíduos</b>	O declínio da qualidade do minério pode levar a um grande aumento nos resíduos de mineração (por exemplo, rejeitos, estéril); a ruptura de barragens de rejeitos pode causar desastres ambientais em grande escala (por exemplo, o colapso da barragem de Brumadinho no Brasil).
<b>Governança</b>	As receitas minerais em países ricos em recursos nem sempre foram usadas para apoiar o crescimento econômico e industrial e muitas vezes são desviadas para financiar conflitos armados ou para ganho privado.
<b>Saúde e segurança</b>	Os trabalhadores enfrentam más condições de trabalho e riscos no local de trabalho (por exemplo, acidentes, exposição a produtos químicos tóxicos).
<b>Direitos humanos</b>	A exploração mineral pode levar a impactos adversos na população local, como trabalho infantil ou forçado.

Fonte: IEA (2021), adaptado pelos autores.

Uma questão central a ser discutida sobre a produção de minerais necessários à geração de energia renovável é que esta emprega equipamentos específicos, que integram em seus componentes recursos minerais não renováveis. Por outro lado, alguns dos recursos minerais embutidos nos equipamentos do período atual podem ser utilizados também nos próximos períodos, o que não ocorre nas fontes de geração de energia convencionais.

É o caso da energia eólica ou solar, em comparação com o carvão ou o gás. Quando uma unidade de energia gerada por fonte não renovável é usada diretamente como combustível para geração de energia através da combustão, como é o caso do petróleo e gás, a quantidade de recursos utilizada é perdida, ou seja, consumida (BLONDEEL *et al.* 2021). No entanto, quando uma unidade de recurso mineral embutida em um equipamento ou infraestrutura é usada para produção de energia por fonte renovável, esta fornece um fluxo de serviços para geração de energia por um determinado intervalo de tempo e ao final de seu ciclo de vida, ou seja, no fim da vida útil do equipamento, estes materiais podem voltar aos estoques secundários de recursos minerais, pois alguns deles podem ser reciclados (FABRE *et al.* 2020).

Em termos dos metais utilizados na composição destes equipamentos ou da infraestrutura voltada a geração de energia por fonte renovável, quanto maior a taxa de reciclabilidade ou recuperação secundária dos metais envolvidos, menor será a necessidade de extração de mais matérias-primas metálicas no futuro. Contudo, do ponto de vista tecnológico, a reciclagem de metais depende do seu uso primário, a fim de que possa ser elaborada, com algum atraso, a sua utilização secundária na condição de reciclado (FABRE

*et al.* 2020). Deve-se notar ainda que alguns metais possuem baixos índices de recuperação a partir de seus principais produtos, como o caso do nióbio presente nos aços. Um estudo de caso sobre materiais críticos e estratégicos na interface com a economia circular, que aborda especificamente a cadeia produtiva do nióbio brasileiro e seu ciclo de vida, está apresentado no recente relatório final do projeto executado pelo CETEM em parceria com o IBICT e apoio do *Joint Research Centre* da União Europeia (PEITER *et al.* 2020)

Do ponto de vista da modelagem sobre o nível de dependência do suprimento de metais para alavancar a transição energética, Fabre *et al.* (2020) esclarecem que num período inicial, mesmo considerando um alto índice de reciclagem para alguns metais, como o alumínio, será demandado um incremento significativo na prospecção e utilização de metais para as etapas iniciais de formação do novo sistema.

Para Fernandes *et al.* (2014) os empreendimentos minerários, devido a sua grande extensão territorial, costumam causar impactos socioeconômicos e ambientais negativos, impactando não apenas as localidades em que ocorre a exploração das jazidas de determinada substância mineral, mas também nas localidades em que o minério percorre ao ser transportado – através de estradas de ferro ou minerodutos, até chegar nos portos por onde é exportado. Como apontado por Green *et al.* (2021) e Giusti *et al.* (2020), essas dinâmicas das cadeias produtivas de mineração no Brasil apresentam significativos impactos que estão associados especialmente à extração do minério de ferro, do ouro e da bauxita. Os autores mostram que há significativos impactos provocados sobre a saúde humana, sobre os modos de vida tradicionais e sobre a existência de

condições de trabalho, além dos impactos ao meio físico e biótico, quando há frequentemente contaminação dos corpos hídricos, contaminação dos solos.

A economia circular também nos apresenta alternativas inovadoras, como no caso dos hidrocarbonetos que podem continuar a desempenhar um papel importante mesmo com a transição para baixas emissões, desde que as tecnologias de Captura, Utilização e Armazenamento do Carbono (CCUS – em inglês: *Carbon Capture, Utilization and Storage*) sejam adequadamente implantadas enquanto opções de reutilização e reciclagem (ELIZÁRIO *et al.* 2021). Esta tecnologia é capaz de converter o CO<sub>2</sub> contido nos gases de efeito estufa (GEE) em produtos de maior valor agregado e, assim, proporcionar a descarbonização até mesmo dos setores tradicionalmente emissores de GEE.

Por outro lado, cabe também observar que o hidrogênio, o qual vem sendo indicado como nova alternativa renovável, não é uma fonte primária de energia e sim um portador de energia, porque deve ser produzido a partir de outra fonte de energia. Existem diferentes formas para sua produção e classificações para sua produção, tais como: o hidrogênio cinza, advindo do gás natural; o hidrogênio preto, oriundo do carvão mineral; o hidrogênio azul, produzido a partir de combustíveis fósseis por meio das tecnologias de CCUS; e o hidrogênio verde, obtido a partir da eletrólise alimentada por fonte de energia renovável (VAN DER GRAAF *et al.* 2020). Cabe mencionar ainda que as tecnologias de CCUS podem ser acopladas às indústrias siderúrgicas, cimenteiras, petroquímicas e outras ligadas aos setores de transporte e energia, evitando a emissão de bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> que são liberadas pelo setor de energia tradicional.

A ideia da utilização do hidrogênio como uma alternativa sustentável vem ganhando força, pois o hidrogênio pode ser aplicado em diversos setores, tanto setores tradicionais como inovadores de alta tecnologia (IEA; OECD, 2019). Contudo esta é ainda uma tecnologia em desenvolvimento com diversos obstáculos, pois o processo de captura e tratamento dos gases, por exemplo, exige a utilização de tecnologias de ponta eficazes para a recuperação e a purificação do hidrogênio, bem como implicam numa avaliação técnico-econômica consistente da integração do gás reciclado em uma cadeia de abastecimento.

Na sequência desta ampla discussão, será abordado na seção seguinte os aspectos chave da recente política de promoção dos minerais estratégicos brasileiros e um panorama de sua produção recente.

## 6 | A POLÍTICA DE PROMOÇÃO DOS MINERAIS ESTRATÉGICOS BRASILEIROS

O Brasil por meio do Ministério de Minas e Energia (MME) disponibilizou a primeira lista de minerais estratégicos para o Brasil em 2021, cumprindo um objetivo estratégico do Plano Nacional de Mineração 2030 – PNM (Brasil, 2011, p.125), o estabelecimento de diretrizes para Minerais Estratégicos. A lista de minerais estratégicos brasileira foi elaborada conforme três categorias propostas originalmente no PNM (p. 63) e que foram ratificadas através de diversas publicações subsequentes, entre as quais se destacam: a Estratégia nacional de ciência tecnologia e inovação 2016/2022 (Brasil, 2016), o Plano de ciência, tecnologia e inovação para minerais estratégicos: 2018-2022 (Brasil, 2018) e o Programa mineração e desenvolvimento (Brasil, 2020a).

No primeiro trimestre, o decreto nº 10.657 (Brasil, 2021a) instituiu o programa Pró-minerais estratégicos, pelo qual foram qualificados os critérios para a análise dos projetos minerários e de investimentos para a produção de minerais estratégicos. A referida lista de minerais estratégicos brasileiros definidos pelo MME foi publicada oficialmente na Resolução nº 2 de 18 de junho de 2021 (Brasil, 2021b) e está apresentada a seguir.

**Bens minerais que o país depende de seu suprimento para setores econômicos vitais:** enxofre, fosfato, potássio, molibdênio.

**Bens minerais importantes por sua aplicação em produtos e processos de alta tecnologia:** cobalto, cobre, estanho, grafita, metais do grupo platina, lítio, nióbio, níquel, silício, tálio, tântalo, terras raras, titânio, tungstênio, urânio, vanádio.

**Bens minerais que o país detém vantagens competitivas e essenciais para a economia:** alumínio, cobre, ferro, grafita, ouro, manganês, nióbio, urânio.

Os três grupos de minerais estratégicos propostos apresentam panoramas distintos. Embora o Brasil detenha uma posição de destaque no mercado internacional como produtor dos bens minerais classificados como essenciais para a economia, os bens minerais que o país depende de seu suprimento, vitais, por exemplo, para a produção de fertilizantes da agroindústria e indústria química, para os quais o país apresenta grande dependência de fontes externas, denotam, contudo, um entendimento que estes podem ser considerados críticos as cadeias produtivas nacionais. Segundo o anuário estatístico do setor de transformação de não-metálicos, por exemplo, aproximadamente 81% do consumo interno de Potássio é provisionado através de importações (Brasil, 2020b).

Adicionalmente, observa-se na referida lista que nióbio, cobre, grafita e urânio estão listados em dois grupos, o que suscita uma possível redundância, porém subentende-se com esta divisão que embora o país detenha vantagens na produção primária destes bens minerais, a sua aplicação em produtos e processos associados a alta tecnologia carecem de melhorias na infraestrutura de suas cadeias produtivas e investimento significativo para expansão do setor de transformação mineral e indústria de bens acabados.

Uma das formas para o setor mineral contribuir para as iniciativas necessárias para a promoção dessa transição tecnológica-industrial no Brasil é pela captura de parte da renda mineral produzida pelo setor, revertendo-a em

investimentos em PD&I, tecnologias mais sustentáveis e produção de conhecimento focada em produtos e processos ligados a alta tecnologia e transição energética. No Brasil o principal instrumento institucional capaz de cumprir tal tarefa é a Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM) que é a forma jurídica dos *royalties* da mineração brasileira.

Dada a característica não renovável dos recursos minerais e sua condição como *commodity*, seu uso deve ser planejado sob uma perspectiva temporal que inclua o pós-exploração, o que significa pensar e fomentar estratégias para garantir a redução da dependência em relação a determinados bens minerais e a transição energética para um modelo mais eficiente e com menor demanda por combustíveis fósseis.

Entre as leis que regulam a cobrança e repasse da CFEM, a mais recente, Lei 13.540 de dezembro de 2017 (Brasil, 2017), recomenda que pelo menos 20% da receita obtida pelo repasse da CFEM aos entes federativos, deve ser preferencialmente revertido em políticas e ações voltadas ao desenvolvimento tecnológico e sustentável. Nos termos da própria Lei, Art. 2º, § 6º *“Das parcelas de que tratam os incisos V e VI do § 2º deste artigo, serão destinados, preferencialmente, pelo menos 20% (vinte por cento) de cada uma dessas parcelas para atividades relativas à diversificação econômica, ao desenvolvimento mineral sustentável e ao desenvolvimento científico e tecnológico”*.

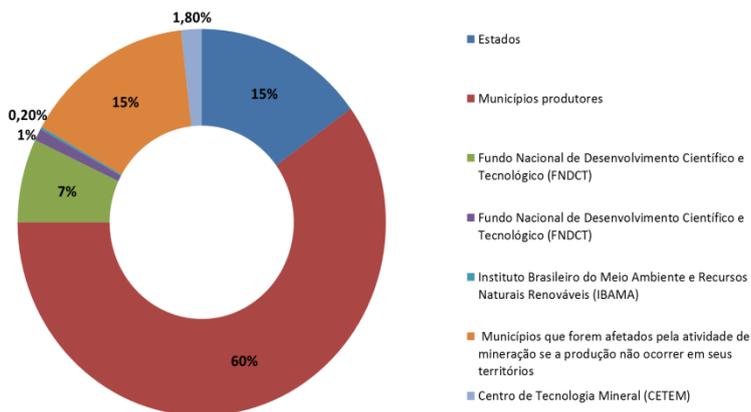
Na última década têm se mostrado promissores os números relativos à arrecadação da CFEM entre os entes federativos, sobretudo entre os municípios produtores. A arrecadação entre 2015 e 2021 subiu mais de 500%, passando de R\$ 1,5 para

R\$10,3 bilhões. Desse total, 60% foi repassado aos cerca de 2.600 municípios produtores, que receberam R\$ 17,4 bilhões nos últimos 7 anos.

Todavia, apesar do aumento significativo da arrecadação de CFEM na última década e de sua crescente participação na composição orçamentária dos municípios produtores no Brasil, os resultados de estudos recentes desenvolvidos pelo NETMIN/CETEM apontam que a recomendação legal de investimento de parte desta renda mineral (20%), não tem sido atendida pelas administrações municipais.

A partir da análise das Leis Orçamentárias Anuais municipais de 2019, 2020 e 2021, dos 30 maiores municípios produtores de substâncias minerais no Brasil, nos quais se concentra cerca de 90% da arrecadação da CFEM, concluiu-se que, 25% desses não prevê nenhum investimento dos *royalties* minerais em indústria e diversificação econômica e produtiva, 315 não indicam investimento desta contribuição em meio ambiente e nenhum município analisado apresentou previsão de direcionamento de parte da CFEM para as áreas de ciência e tecnologia.

Cabe mencionar que outros aspectos da Lei 13.540/2017, esses mandatórios, também não têm sido atendidos pela administração pública federal. Considerando a distribuição da arrecadação da CFEM prevista na referida Lei, ilustrada no Gráfico 1, é possível afirmar que instituições e políticas públicas com potencial de contribuição para o desenvolvimento tecnológico e sustentável, incluindo a transição energética, deveriam receber importantes investimentos.



Fonte: ANM (2017), adaptado pelos autores.

**Gráfico 1.** Repartição da CFEM segundo a Lei Nº 13.540/2017.

Contudo, os repasses previstos para as instituições e fundos de pesquisa não têm sido realizados, conforme previsto na supramencionada Lei. A título de exemplo, uma análise da LOA federal 2020 revelou que não há sequer previsão orçamentária de repasse da CFEM para o FNDCT ou para o CETEM.

Considerando apenas o valor de CFEM arrecadado nos últimos 3 anos (2019, 2020 e 2021), significa dizer que essas instituições deixaram de receber, R\$ 1,4 bilhões e R\$ 379.000.000, respectivamente.

Tomando o exemplo do CETEM, uma unidade de pesquisa do MCTI, com consolidada experiência e grande potencial de produção de conhecimento e inovação tecnológica para o setor mineral, somente o valor não repassado em 2021 corresponde a aproximadamente de R\$ 185.000.000, o que representa cerca de 18 vezes o orçamento da instituição neste ano.

Em relação aos bens minerais que compõem a lista de minerais estratégicos brasileira, os dados do sistema arrecadatório da CFEM fornecem uma fonte de dados estatísticos da produção do setor mineral brasileiro periodicamente atualizada, sobre a qual é possível extrair dados consistentes e que fornecem um quadro atualizado da produção destes bens. Para tal, foi realizada uma compatibilização das substâncias que compõem a lista de minerais estratégicos, dividida segundo os três grupos prioritários definidos, e harmonizadas com as “substâncias agrupadoras”, conforme classificadas pela ANM no sistema de arrecadação da CFEM. A seguir serão apresentados os três grupos de bens minerais estratégicos separadamente, iniciando pelo Quadro 4, que apresenta os minerais que o país depende de seu suprimento para setores econômicos vitais.

**Quadro 4.** Classificação ANM dos bens minerais estratégicos que o país depende de seu suprimento.

Bens minerais estratégicos	Substância agrupadora (CFEM/ANM)	Arrecadação CFEM [R\$ Milhões] (2021)
Enxofre	Enxofre	x
Fosfato	Fosfato	R\$ 54,02
Molibdênio	Minério de Molibdênio	x
Potássio	Rocha potássica	R\$ 0,16
	Sais de potássio	R\$ 12,24

Fonte: ANM (2022) , dados de 2021, adaptado pelos autores.

Entre os minerais estratégicos que o Brasil depende de seu suprimento através de fornecedores externos, nota-se que não houve produção interna de Enxofre e Molibdênio nos últimos 5 anos (2017-2021) e não existem títulos minerários cadastrados para estas substâncias, que são utilizadas como componentes de fertilizantes e também por outros setores, como a indústria farmacêutica, química e metalurgia.

Em relação ao Fosfato, em 2021 estiveram cadastrados 29 títulos minerários distribuídos em 18 municípios, cuja produção extrativa se concentra em três municípios: Ouvidor-GO (24,97%), Tapira-MG (23,11%) e Patrocínio-MG (19,25%), responsáveis por 67% da produção. Para o Potássio, que na classificação da ANM se subdivide em Rocha Potássica e Sais de Potássio, verificam-se atualmente 17 títulos minerários, distribuídos em 7 municípios, destacando-se, em relação a Rocha Potássica, os municípios de: São Gotardo-MG (62,90%), Andradas-MG (26,66%) e Poços de Caldas (10,45%); e em relação aos Sais de Potássio, apenas dois municípios: Rosário do Catete-SE (73,94%) e Carmópolis (26,06%).

No Quadro 5 a seguir, estão apresentados os bens minerais considerados importantes por sua aplicação em produtos e processos de alta tecnologia, intitulados minerais portadores de futuro no Plano Nacional de Mineração (2010). Observa-se que quatro substâncias que compõem este grupo, também se enquadram no terceiro grupo (cobre, grafita, nióbio e urânio), portanto serão apresentadas adiante.

**Quadro 5.** Classificação ANM dos bens minerais estratégicos considerados “portadores de futuro”.

<b>Bens minerais estratégicos</b>	<b>Substância agrupadora (CFEM/ANM)</b>	<b>Arrecadação CFEM [R\$ Milhões] (2021)</b>
Cobalto	Minério de Cobalto	x
Estanho	Minério de Estanho	36,79
Metais do grupo platina	Minério de Rutênio	x
	Minério de Ródio	x
	Minério de Paládio	x
	Minério de Ósmio	x
	Minério de Irídio	x
	Minério de Platina	x
Lítio	Minério de Lítio	5,49
Níquel	Minério de Níquel	48,74
Silício	Minério de Silício	0,16
Tálio	Minério de Tálio	x
Tântalo	Minério de Tântalo	4,44
Terras Raras	Escândio	x
	Ítrio	x
	Cério	0,045
	Lantânio	x
	Praseodímio	x
	Neodímio	x
	Promécio	x
	Samário	x
	Európio	x

**Quadro 5.** Classificação ANM dos bens minerais estratégicos considerados “portadores de futuro”.

continuação

Bens minerais estratégicos	Substância agrupadora (CFEM/ANM)	Arrecadação CFEM [R\$ Milhões] (2021)
Terras Raras	Gadolínio	x
	Térbio	x
	Disprósio	x
	Hólmio	x
	Érbio	x
	Túlio	x
	Itérbio	x
	Lutécio	x
Titânio	Minério de Titânio	1,81
Tungstênio	Minério de Tungstênio	0,75
Vanádio	Minério de Vanádio	3,48

Fonte: ANM (2022), dados de 2021, adaptado pelos autores.

Neste segundo grupo de minerais estratégicos brasileiros, observa-se que várias substâncias não apresentam registros de produção extrativa nos últimos cinco anos (2017-2021), embora o Brasil detenha reservas minerais potenciais ou estimadas, ainda não economicamente exploradas, que são os casos do: Cobalto, Metais do grupo platina e Tálío.

As Terras Raras englobam 17 substâncias distintas, na compatibilização com a classificação de substâncias agrupadoras da ANM, estão divididas em três grupos: Minério de Escândio (sem registro de extração entre 2017 e 2021), Ítrio (sem registro de extração entre 2017 e 2021) e Minério de

Cério, que engloba em seu subgrupo: Lantânio, Praseodímio, Neodímio, Promécio, Samário, Európio, Gadolínio, Térbio, Disprósio, Hólmio, Érbio, Túlio, Itérbio e Lutécio). Em relação a produção de Minério de Cério (e substâncias agrupadas nesta categoria), a arrecadação de CFEM em 2021 deste subgrupo foi de 45,04 mil reais, tendo o seu maior pico na série histórica recente (2017-2021) de 75,79 mil reais em 2017, estando sua produção concentrada em apenas dois municípios: São Francisco de Itabopoana-RJ (99,69%) e Conceição do Castelo-ES (0,31%).

Entre as demais substâncias com registro de extração nos últimos cinco anos, através do sistema CFEM/ANM, destacam-se em 2021: Níquel, com atualmente 8 títulos minerários e arrecadação de 48,74 milhões de CFEM (2021), cuja produção está concentrada em Itagibá-BA (56,25%), Barro Alto-GO (35,30%) e Parauapebas-PA (8,27%); Estanho, atualmente com 81 títulos minerários e arrecadação de 36,79 milhões, cuja produção está dispersa por 14 municípios, entre os quais se destacam os municípios da Região Norte: Presidente Figueiredo-AM (35,52%), Ariquemes-RO (30,16%) e Itaituba-PA (7,03%); Lítio, com 2 títulos minerários e arrecadação de 5,49 milhões, distribuída em 3 municípios: Nazareno-MG (88,51%), Itinga-MG (10,88%) e Araçuaí-MG (0,61%); Tântalo, atualmente com 6 títulos minerários e arrecadação de 4,44 milhões, tem sua produção distribuída majoritariamente por: Nazareno-MG (52,53%), Presidente Figueiredo-AM (46,62%) e Frei Martinho-PB (0,56%); Vanádio, com apenas 1 título minerário e arrecadação de 3,48 milhões em 2021, concentrada em Maracás-BA; Titânio, que detém 7 títulos minerários em 2021 e arrecadação de 1,81 milhões, que está concentrada em Mataraca-PB (96,24%), mas também é

produzido em menor escala em São Francisco do Itabapoana-RJ (1,71%), Campo Novo de Rondônia-RO (1,67%), e com menos de 1% da produção em Itapuã do Oeste-RO e Santa Bárbara de Goiás-GO; Tungstênio, com 11 títulos minerários e produção inferior a 1 milhão de reais, concentra-se em Currais Novo-RN (94,77%) e Bodó-RN (5,23%); e, por fim, a substância com menor arrecadação entre as que o país deteve extração nos últimos cinco anos, o Silício, com 1 título minerário e 160 mil de arrecadação, localizada em São Geraldo do Araguaia-BA.

O terceiro grupo refere-se aos bens minerais estratégicos que o Brasil detém vantagens competitivas e podem ser considerados essenciais para gerar superávit a economia nacional.

**Quadro 6.** Classificação ANM dos bens minerais estratégicos que o país detém vantagens competitivas.

Bens minerais estratégicos	Substância agrupadora (CFEM/ANM)	Arrecadação CFEM [R\$ Milhões] (2021)
Cobre *	Minério de Cobre	354,18
Grafita *	Grafita	7,10
Nióbio *	Minério de Nióbio	28,04
Urânio *	Minério de Urânio	0,54
Alumínio	Minério de Alumínio	156,57
Ferro	Minério de Ferro	8.700,16
Manganês	Minério de Manganês	14,38
Ouro	Minério de Ouro	410,24

\*Bens minerais estratégicos também inclusos no Grupo II.

Fonte: ANM (2022), dados de 2021, adaptado pelos autores.

Os bens minerais que compõem este grupo ressaltam vantagens econômicas ou estratégicas para a competitividade do setor mineral brasileiro, ou seja, destacam os bens que o Brasil detém posição de destaque no mercado internacional ou que proporcionam vantagens estratégicas para o país. Em termos de valor de mercado, observa-se que a Grafita e o Urânio apresentam uma produção comparativamente menor que os demais bens minerais que compõem o grupo, contudo são bens de significativa importância e relativa escassez, o que ressalta sua pertinência neste grupo. A Grafita acumula em 2021 um total de 6 títulos minerários distribuídos em 6 municípios, dentre os quais se destacam: Pedra Azul-MG (49,40%), Salto da Divisa-MG (32,65%) e Carmo da Mata (16,05%). Por sua vez, o Urânio apresenta apenas 1 título minerário, localizado em Caetité-BA.

Em relação as demais substâncias, cuja produção é ressaltada na indústria extrativa mineral do Brasil, o Ferro é o principal minério arrecadador de *royalties* da mineração, responsável por aproximadamente 90% do aferido via CFEM em 2021, com 133 títulos minerários dispersos por 59 municípios produtores, entre os quais se destacam: Parauapebas-PA (27,86%), Canaã dos Carajás-PA (20,22%), Conceição do Mato Dentro-MG (7,65%), responsáveis por 55% da produção. A segunda produção mais significativa é o ouro, que engloba 750 títulos minerários e de lavra garimpeira, o recordista em quantidade de títulos por substância agrupadora, cuja produção está dispersa por 74 municípios, cujos maiores destaques são: Paracatu-MG (19,26%), Itaituba-PA (15,16%) e Sabará (9,83%).

Na posição seguinte de classificação neste grupo de minerais estratégicos está o cobre, com 17 títulos de mineração dispersos em 10 municípios, com destaque para: Marabá-PA

(44,65%), Canaã dos Carajás-PA (21,83%) e Alto Paraíso-GO (17,16%), que respondem por 83% da produção extrativa nacional. Com aproximadamente a metade da performance está o Alumínio, que na classificação da ANM é intitulado minério de alumínio, mas que corresponde predominantemente a bauxita, para o qual estão registrados 69 títulos minerários que se situam em 26 municípios, tendo como os três maiores produtores, responsáveis por 90% da produção, os municípios do Pará: Paragominas-PA (43,77%), Oriximiná-PA (25,34%) e Juruti-PA (20,26%).

Por fim, com uma posição intermediária no montante arrecadado por substância, porém com destacada relevância no mercado internacional estão o Manganês e Nióbio, ambos considerados internacionalmente como minerais críticos, sendo o Manganês o quarto metal mais utilizado no mundo, contudo o nióbio pode ser considerado o mais diferenciado posto que o Brasil detém aproximadamente 90% da produção mundial. Para o minério de manganês estão registrados 38 títulos minerários localizados em 22 municípios, sendo os mais destacados os municípios de: Ladário-MS (47,48%), Parauapebas-PA (18,85%) e Ocara-CE (6,36%), que respondem por 73% da produção deste minério. Por sua vez, o nióbio reúne 21 títulos minerários dispersos por 9 municípios, que estão concentrados principalmente em: Catalão-GO (49,72%), Araxá-MG (42,91%) e Ovidor-GO (4,92%), que somados são responsáveis por 97% da produção primária deste metal.

Salvaguardadas algumas exceções, como o Ouro que apresenta grande dispersão da produção extrativa, pode-se avaliar que a rigidez locacional, característica dos recursos minerais, é ainda mais acentuada pela concentração de

unidades industriais para a produção de minerais estratégicos em grandes municípios produtores, cujos três maiores, em geral, respondem por uma porção significativa da produção total, em alguns casos chegando a sua totalidade. Principalmente em relação ao grupo de minerais intitulados portadores de futuro, esta informação ressalta a necessidade de investimentos em pesquisa científica, mecanismos de estímulo a infraestrutura e diversificação do setor de transformação mineral e indústria geral para que a cadeia avance para produtos de maior valor agregado, ampliando a capacidade do setor industrial extrativo mineral. Desta forma, o Brasil poderia dar um salto em sua posição de mero fornecedor de matérias-primas pouco elaboradas para se impulsionar e se inserir em novos mercados, como os ligados a alta tecnologia ou mesmo nas tecnologias ditas disruptivas como as que estão ligadas a transição energética.

## 7 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste complexo cenário mundial que se desenrola em torno das iniciativas mundiais para frear o aquecimento global e os efeitos adversos da mudança climática, a transição energética para fontes de energia consideradas renováveis é uma etapa tecnológica fundamental para a garantia dos modos de produção e consumo mundiais do futuro.

No entanto, esta transição não será facilmente negociável frente aos arranjos institucionais enraizados numa matriz energética a base de combustíveis fósseis. A geração de impactos econômicos e a ampliação de conflitos sociais pré-existentes envolvem parte dos processos de resistência a esta transição, que por sua vez gerariam novas crises às economias dependentes do sistema energético tradicional. Além disso, os efeitos ambientais não estão isentos no processo de transição tecnológica do alto carbono para o baixo carbono, posto que as tecnologias consideradas limpas, por captar energia de fontes renováveis, requerem a extração de matérias-primas minerais não-renováveis, as quais, frequentemente, estão localizadas em territórios que estão sujeitos a regulações e atividades extrativas que nem sempre empregam as melhores práticas ambientais, sociais e recursos tecnológicos disponíveis.

Entre as forças de mudança que contribuem para essa transformação dos sistemas energéticos, segundo a publicação da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2019), podem ser elencadas seis questões centrais: (i) a redução dos custos de produção, (ii) o endereçamento de respostas aos problemas de poluição e a mudança climática, (iii) as metas pactuadas entre os países para aumento da participação das energias renováveis nas matrizes energéticas nacionais, (iv) o

incentivo a inovação tecnológica, (v) o engajamento de ações e soluções a partir de grandes investidores e corporações para a sociedade, (vi) o fortalecimento das iniciativas oriundas da sociedade civil organizada para o engajamento cidadão na questão do clima e na redução da poluição.

O Brasil tem nesse momento uma oportunidade inestimável de assumir uma posição de liderança como potência ambiental e se tornar um fornecedor mundial de energia sustentável e/ou de produtos que utilizaram matérias-primas provenientes de fontes sustentáveis. Para tal será importante participar da transição energética mais concreta e decididamente, procurando ampliar e diversificar seu papel para além de mero fornecedor de minérios e concentrados. Esta estratégia deve unir esforços dos vários intervenientes e atores estratégicos, tanto ligados ao processo produtivo e desenvolvimento científico, como também de segmentos da sociedade civil organizada que corroborem na conscientização e internalização das ambiciosas metas produtivas, ambientais e sociais.

Esta complexa discussão sugere potencializar o pensamento crítico diante da premência de se repensar nossas ações e modos de vida, em âmbitos locais e globais, nacional e internacional, para assegurar vias de sustentabilidade às gerações futuras.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARMSTRONG, C. Decarbonisation and world poverty: a just transition for fossil fuel exporting countries? *Political studies*, v.68, n.3, p.671-688. 2020.

BAI, J.; XU, X.; DUAN, Y.; ZHANG, G.; WANG, Z.; Wang, L.; ZHENG, C. Evaluation of resource and environmental carrying capacity in rare earth mining areas in China. *Scientific Reports*, v.12, n. 6105. 2022.

BAINTON, N.; KEMP, D.; LÈBRE, E.; OWEN, J.R.; MARSTON, G. The energy-extractives nexus and the just transition. *Sustainable Development*, v.29, n.4, p.624-634. 2021.

BARTEKOVÁ, E.; KEMP, R. Critical raw material strategies in different world regions. Working Paper Series. Maastricht: UNU-MERIT - United Nations University; Maastricht University. 2016.

BLACKWILL, R.D. & O'SULLIVAN, M. America's energy edge: the geopolitical consequences of the shale revolution. *Foreign Affairs*, v.93, p.102-114. 2014.

BLONDEEL, M.; BRADSHAW, M.J.; KUZEMKO, C. The geopolitics of energy system transformation: a review. *Geography Compass*, v. 15, n. 7 [e12580]. 2021.

BRASIL. Decreto nº 10.657, de 24 de março de 2021. Institui a Política de Apoio ao Licenciamento Ambiental de Projetos de Investimentos para a Produção de Minerais Estratégicos – Pró-Minerais Estratégicos, dispõe sobre sua qualificação no âmbito do Programa de Parcerias de Investimentos da Presidência da República e institui o Comitê Interministerial de Análise de Projetos de Minerais Estratégicos. *Diário Oficial, Brasília*, p. 3, 25 mar. 2021a.

BRASIL. Decreto Nº 9.073, de 5 de junho de 2017, que promulga o Acordo de Paris sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima. Brasília: Planalto.

BRASIL. Resolução nº 2, de 18 de junho de 2021. Define a relação de minerais estratégicos para o País, de acordo com os critérios de que trata o art. 2º do Decreto nº 10.657, de 24 de março de 2021. Diário Oficial, Brasília, p. 103, 22 jun. 2021b.

BRITTO, F.G.A. et al. Revisão do Banco de Dados de Recursos Minerais e Territórios: contribuições de uma nova abordagem teórico-metodológica para análise das dinâmicas territoriais na mineração. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2020. (Série Estudos e Documentos, 106).

CASTRO, F.F.; PEITER, C.C.; GÓES, G.S. Minerais estratégicos e as relações entre Brasil e China: oportunidades de cooperação para o desenvolvimento da indústria mineral brasileira. Revista Tempo do Mundo/IPEA, v.24, p.349-378, 2021.

EC – European Commission. Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU – a foresight study. Luxemburgo: União Europeia. 2020a.

EC – European Commission. Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability. Com 0474/2020. Bruxelas: EC, 2020b.

EC – European Commission. Policy and strategy for raw materials. Raw Materials Information System (RMIS). 2017.

EC – European Commission. Report on critical raw materials and the circular economy. Raw Materials Information System (RMIS). 2018.

ELIZÁRIO, S.; OLIVEIRA, L.; VINÍCIUS, J.; DANTAS, M.C.; CASTRO, N. Economia Circular: o papel do hidrogênio rumo à transição energética. Grupo de Estudos do Setor Elétrico. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2021.

FABRE, A.; FODHA, M.; RICCI, F. Mineral resources for renewable energy: optimal timing of energy production. *Resource and Energy Economics*, v.59. 2020.

FATTOUH, B. Saudi oil policy: continuity and change in the era of the energy transition. Oxford: Oxford Institute for Energy Studies. 2021.

GIURCO, D.; MCLELLAN, B.; FRANKS, D.M.; NANSAI, K. Responsible mineral and energy futures: views at the nexus. *Journal of Cleaner Production*, v.84, p.322-328. 2014.

GREEN, M.P.L.; LINO, L.B. da S.; DE BRITTO, F.G.A.; NASCIMENTO, J.A.S. Efeitos da cadeia produtiva mineral sobre os territórios: Uma análise dos casos do Banco de Dados Recursos Minerais e Territórios do CETEM / Effects of the mineral production chain on territories: An analysis of the cases of CETEM's Database of Mineral Resources and Territories. *Brazilian Journal of Development*, [S. l.], v. 7, n. 11, p. 109240-109252, 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n11-514. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/40269>. Acesso em: 29 nov. 2022.

GRIGAS, A. The new geopolitics of natural gas. Cambridge: Harvard University Press. 2017.

HERTWICH, E.G.; GIBON, T.; BOUMAN, E.A.; ARVESEN, A.; SUH, S.; HEATH, G.A.; BERGESEN, J.D.; RAMIREZ, A.; VEGA, M.I.; SHI, L. Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, v.112, n.20, p.6277-6282. 2015.

HIRSCH, R.F.; BEZDEK, R.; WENDLING, R. Peaking of world oil production: impact, mitigation and risk management. Office of Scientific and Technical Information. US Department of Energy. Feb. 2005.

IEA – International Energy Agency. The role of critical minerals in clean energy transitions. World Energy Outlook Special Report. Paris: IEA publications. 2021.

IEA – International Energy Agency. World Energy Outlook 2020. IEA, 2020.

IMF – International Monetary Fund. Energy Transition Metals. Lukas Boer, Andrea Pescatori, Martin Stuermer (Org.). IMF Working Paper. 2021.

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Aquecimento Global de 1,5°C. Relatório Especial. Governo do Brasil (Trad.). Suíça: IPCC. 2018.

IRENA – International Renewable Energy Agency. A new World: the geopolitics of the energy transformation. Global Commission on the geopolitics of energy transformation; IRENA, 2019.

IRTC – International Round Table on Materials Criticality. Material Criticality: an overview for decision makers. Brussels: IRTC. 2020.

KLARE, M.T. The race for what's left: the global scramble for the world's last resources. New York: Matropolitan. 2012.

KONING, A.; KLEJIN, R.; HUPPES, G.; SPRECHER, B.; VAN ENGELEN, G. Metal supply constraints for a low-carbon economy? Resources, Conservation & Recycling, v.129, p.202-208. 2018.

LE BILLION, P. & KRISTOFFERSEN, B. Just cuts for fossil fuels? Supply-side carbon constraints and energy transition. *Environment and planning*, v.52, n.6, p.1072-1092. 2020.

LÈBRE, É.; STRINGER, M.; SVOBODOVA, K.; OWEN, J.R.; KEMP, D.; CÔTE, C.; ARRATIA-SOLAR, A.; VALENTA, R.K. The social and environmental complexities of extracting energy transition metals. *Nature Communications*, v.11, n.4823. 2020.

LEE, J.; BAZILIAN, M.; SOVACOOOL, B.; GREENE, S. Responsible or reckless? A critical review of the environmental and climate assessments of mineral supply chains. *Environ. Res. Lett.*, v. 15, n. 103009. 2020.

MANCHERI, N.; SUNDARESAN, L.; CHANDRASHEKAR, S. Dominating the world: China and the rare earth industry. Technical report. Bangalore, India: National Institute of Advanced Studies. 2013.

MCLELLAN, B.C.; YAMASUE, E.; TEZUKA, T.; CORDER, G.; GOLEV, A.; GIURCO, D. Critical minerals and energy - impacts and limitations of moving to unconventional resources. *Resources*, v.5, n.19, p.1-40. 2016.

MUFSON, S. & TIMSIT, A. 'It is not enough': World leaders react to COP26 climate agreement. [online]. *The Washington Post*. 14 nov. 2021. Disponível em: <<https://www.washingtonpost.com/climate-environment/2021/11/14/climate-deal-reaction-cop26-world/>>. Acesso em: 14 dez. 2021.

MULVANEY, D. Are green jobs just jobs? Cadmium narratives in the life cycle of photovoltaics. *Geoforum*, v. 54, p.178-186. 2014.

NAKANO, J. The geopolitics of Critical Minerals Supply Chains. Report of the CSIS Energy Security and Climate Change Program. Center for Strategic & International Studies. Washington: CSIS. Mar. 2021.

NATE, S.; BILAN, Y.; KURYLO, M.; LYASHENKO, O.; NAPIERALSKI, P.; KHARLAMOVA, G. Mineral policy within the framework of limited critical resources and a green energy transition. *Energies*, v.14, n. 2688, p. 1-31. 2021.

OECD – Organisation for Economic Co-Operation and Development. The impact of the coronavirus (COVID-19) and the global oil price shock on the fiscal position of oil exporting developing countries. OECF, 2021.

ONU – Organização das Nações Unidas. Acordo de Paris. *Jornal Oficial da União Europeia*. [L 282/4]. ONU, 19 de outubro de 2016.

OWEN, J.R.; KEMP, D.; LÈBRE, É.; SVOBODOVA, K.; PÉREZ MURILLO, G. Catastrophic tailings dam failures and disaster risk disclosure. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v.42. 2020.

PEITER, C.C.; CASTRO, F.F.; GÓES, G.S. Minerais críticos e estratégicos na atual geopolítica mundial. In. *A geopolítica da energia no século XXI*. Guilherme Sandoval Góes (org). Rio de Janeiro: Synergia editora. 2021.

PEITER, Carlos Cesar; XAVIER, Lucia Helena; TRAVERSO, Marzia; ROSSI, Efigênia; ALVARADO, Lígia Marcela; CASTRO, Adelson A.; CASTRO, Fernando F. Study of critical materials' production chains: opportunities and threats of the circular economy. Final Technical Report. Carlos Cesar Peiter (Coord. CETEM.); Gian Andrea Blending (Coord. JRC); Tiago E, Nuness Braga (Coord. IBCTI). [Project 128 and 128a]. CETEM/MCTIC; IBICT/MCTIC; JRC/DGGROW/EU; EESC-USP. June, 2020.

SCHLÖR, H.; VENGHAUS, S.; ZAPP, P.; MARX, J.; SCREIBER, A.; HAKE, J. The energy-mineral-society nexus – A social LCA model. *Applied Energy*, v. 228, p. 999-1008. 2018.

SCHRAER, R. & DEVLIN, K. COP26: the truth behind the new climate change denial. [online]. BBC. 17 nov. 2021. Disponível em: <<https://www.bbc.com/news/science-environment-59251912>>. Acesso em: 14 dez. 2021.

SINN, H.W. The green paradox. A supply-side approach to global warming. Cambridge: The MIT press. 2012.

STANDAERT, Michael. China wrestles with the toxic aftermath of rare earth mining. Yale Environment 360. 9 jul. 2019.

TOKIMATSU, K.; WACHTMEISTER, H.; MCLELLAN, B.; DAVIDSSON, S.; MURAKAMI, S.; HÖÖK, M.; YASUOKA, R.; NISHIO, M. Energy modeling approach to the global energy-mineral nexus: A first look at metal requirements and the 2°C target. Applied Energy, v. 207, p. 494-509. 2017.

UN – United Nations. COP26 closes with ‘compromise’ deal on climate, but it’s not enough, says UN chief. [online]. UN News. 13 nov. 2021. Disponível em: <<https://news.un.org/en/story/2021/11/1105792>>. Acesso em: 13 dez. 2021.

UNDP – United Nations Development Programme. Atlas: mapeando os objetivos de desenvolvimento sustentável na mineração. Relatório Branco. Columbia Center on Sustainable Development; World Economic Forum; PNUD, 2017.

UNEP – United Nations Environment Programme. COP26 ends with agreement but falls short on climate action. [online]. UNEP. 15 nov. 2021. Disponível em: <<https://www.unep.org/news-and-stories/story/cop26-ends-agreement-falls-short-climate-action>>. Acesso em: 13 nov. 2021.

USGS – United States Geological Survey. Critical mineral resources of the United States economic and environmental geology and prospects for future supply. Professional Paper 1802. Reston, Virginia: USDI/USGS, 2017a.

USGS – United States Geological Survey. Tracking critical minerals to ensure national preparedness. [online]. USGS. 16 jan. 2017b. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/news/tracking-critical-minerals-ensure-national-preparedness>>. Acesso em 15 dez. 2021.

VAN DER GRAAF, T.; OVERLAND, I.; SCHOLTEN, D.; WESTPHAL, K. The new oil? The geopolitics and international governance of hydrogen. *Energy Research & Social Science*. v.70. 2020.

VIDAL, O.; GOFFÉ, B.; ARNDT, N. Metals for a low-carbon society. *Nature Geoscience*, v.6. p.894-896. 2013.

VIDAL, O.; ROSTOM, F.; FRANÇOIS, C.; GIRAUD, G.; Global trends in metal consumption and supply: the raw material-energy nexus. *Elements*, v.13, n.5, p.319-324. 2017.

WELSBY, D.; PRICE, J.; EKINS, P. Unextractable fossil fuels in a 1,5°C world. *Nature*, v.597, p.230-234. 2021.

WORLD BANK. Minerals for climate action: the mineral intensity of the clean energy transition. Washington: World Bank. 2020.

WORLD BANK. The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future. Washington: World Bank publications. June, 2017.

## SÉRIES CETEM

As Séries Monográficas do CETEM são o principal material de divulgação da produção científica realizada no Centro. Até o final do ano de 2021, já foram publicados, eletronicamente e/ou impressos em papel, mais de 380 títulos, distribuídos entre as seis séries atualmente em circulação: Rochas e Minerais Industriais (SRMI), Tecnologia Mineral (STM), Tecnologia Ambiental (STA), Estudos e Documentos (SED), Gestão e Planejamento Ambiental (SGPA) e Inovação e Qualidade (SIQ). A Série Iniciação Científica consiste numa publicação eletrônica anual.

A lista das publicações poderá ser consultada em nossa homepage. As obras estão disponíveis em texto completo para download. Visite-nos em <https://www.gov.br/cetem/pt-br/assuntos/repositorio-mineralis-e-biblioteca>.

### Últimos números da Série Estudos e Documentos

SED-110 – **O setor mineral brasileiro e o impacto socioambiental causado pela exploração ilegal dos recursos minerais.** Ana Maria Botelho M. da Cunha e Márcia Viana Sá Earp, 2022.

SED-109 – **O setor mineral brasileiro e a pandemia da Covid-19.** Ana Maria Botelho M. da Cunha e Márcia Viana Sá Earp, 2022.

SED-108 – **Análise de patentes relacionadas aos elementos terras-raras.** Rafael de Carvalho Gomes, Ysrael Marrero Vera e Lídia Yokoyama, 2021.

## **INFORMAÇÕES GERAIS**

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral  
Avenida Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária  
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ  
Geral: (21) 3865-7222  
Biblioteca: (21) 3865-7218  
E-mail: [biblioteca@cetem.gov.br](mailto:biblioteca@cetem.gov.br)  
Homepage: <http://mineralis.cetem.gov.br/>

## **NOVAS PUBLICAÇÕES**

Se você se interessar por um número maior de exemplares ou outro título de uma das nossas publicações, entre em contato com a nossa biblioteca no endereço acima.

Solicita-se permuta.

We ask for interchange.



## Missão Institucional

**Desenvolver tecnologias inovadoras e sustentáveis, e mobilizar competências visando superar desafios nacionais do setor mineral.**

## O CETEM

**O Centro de Tecnologia Mineral - CETEM é um instituto de pesquisas, vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações - MCTI, dedicado ao desenvolvimento, à adaptação e à difusão de tecnologias nas áreas minerometalúrgica, de materiais e de meio ambiente.**

**Criado em 1978, o Centro está localizado no campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, na Cidade Universitária, no Rio de Janeiro e ocupa 20.000m<sup>2</sup> de área construída, que inclui 25 laboratórios, 4 plantas-piloto, biblioteca especializada e outras facilidades.**

**Durante seus 44 anos de atividade, o CETEM desenvolveu mais de 800 projetos tecnológicos e prestou centenas de serviços para empresas atuantes nos setores minerometalúrgico, químico e de materiais.**