

de Castro, Fernando Ferreira; Góes, Geraldo Sandoval; Peiter, Carlos Cesar; Góes, Guilherme Sandoval

Working Paper

Transição energética para fontes de energia renováveis e sua dependência por minerais críticos: Aspectos geoeconômicos

Texto para Discussão, No. 3051

Provided in Cooperation with:

Institute of Applied Economic Research (ipea), Brasília

Suggested Citation: de Castro, Fernando Ferreira; Góes, Geraldo Sandoval; Peiter, Carlos Cesar; Góes, Guilherme Sandoval (2024) : Transição energética para fontes de energia renováveis e sua dependência por minerais críticos: Aspectos geoeconômicos, Texto para Discussão, No. 3051, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), Brasília, <https://doi.org/10.38116/td3051-port>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/306798>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.



<https://creativecommons.org/licenses/by/2.5/br/>

TEXTO PARA DISCUSSÃO

3051

**TRANSIÇÃO ENERGÉTICA PARA
FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS
E SUA DEPENDÊNCIA POR
MINERAIS CRÍTICOS:
ASPECTOS GEOECONÔMICOS**

**FERNANDO FERREIRA DE CASTRO
GERALDO SANDOVAL GÓES
CARLOS CESAR PEITER
GUILHERME SANDOVAL GÓES**



**TRANSIÇÃO ENERGÉTICA PARA FONTES
DE ENERGIA RENOVÁVEIS E SUA
DEPENDÊNCIA POR MINERAIS CRÍTICOS:
ASPECTOS GEOECONÔMICOS**

FERNANDO FERREIRA DE CASTRO¹

GERALDO SANDOVAL GÓES²

CARLOS CESAR PEITER³

GUILHERME SANDOVAL GÓES⁴

1. Psicossociólogo e doutorando no Programa de Engenharia Mineral da Universidade de São Paulo (USP). *E-mail:* alemiu@gmail.com.

2. Pesquisador colaborador na Diretoria de Estudos e Políticas Macroeconômicas do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Dimac/Ipea). *E-mail:* geraldo.goes@ipea.gov.br.

3. Pesquisador colaborador do Centro de Tecnologia Mineral do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (Cetem/MCTI). *E-mail:* ccpeiter@gmail.com.

4. Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Segurança Internacional e Defesa (PPGSID) da Escola Superior de Guerra (ESG). *E-mail:* guilherme.sandoval@terra.com.br.

Governo Federal

Ministério do Planejamento e Orçamento

Ministra Simone Nassar Tebet

ipea Instituto de Pesquisa
Econômica Aplicada

Fundação pública vinculada ao Ministério do Planejamento e Orçamento, o Ipea fornece suporte técnico e institucional às ações governamentais – possibilitando a formulação de inúmeras políticas públicas e programas de desenvolvimento brasileiros – e disponibiliza, para a sociedade, pesquisas e estudos realizados por seus técnicos.

Presidenta

LUCIANA MENDES SANTOS SERVO

Diretor de Desenvolvimento Institucional

FERNANDO GAIGER SILVEIRA

**Diretora de Estudos e Políticas do Estado,
das Instituições e da Democracia**

LUSENI MARIA CORDEIRO DE AQUINO

Diretor de Estudos e Políticas Macroeconômicas

CLÁUDIO ROBERTO AMITRANO

**Diretor de Estudos e Políticas Regionais,
Urbanas e Ambientais**

ARISTIDES MONTEIRO NETO

**Diretora de Estudos e Políticas Setoriais,
de Inovação, Regulação e Infraestrutura**

FERNANDA DE NEGRI

Diretor de Estudos e Políticas Sociais

CARLOS HENRIQUE LEITE CORSEUIL

Diretor de Estudos Internacionais

FÁBIO VÉRAS SOARES

Chefe de Gabinete

ALEXANDRE DOS SANTOS CUNHA

**Coordenadora-Geral de Imprensa e
Comunicação Social**

GISELE AMARAL

Ouvidoria: <http://www.ipea.gov.br/ouvidoria>

URL: <http://www.ipea.gov.br>

Texto para Discussão

Publicação seriada que divulga resultados de estudos e pesquisas em desenvolvimento pelo Ipea com o objetivo de fomentar o debate e oferecer subsídios à formulação e avaliação de políticas públicas.

© Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – Ipea 2024

Transição energética para fontes de energia renováveis e sua dependência por minerais críticos : aspectos geoeconômicos / Fernando Ferreira de Castro ... [et al.]. – Brasília, DF: Ipea, 2024.

-27 p.: il., mapa. – (Texto para Discussão; n. 3051).

Inclui Bibliografia.

ISSN 1415-4765

1. Transição Energética. 2. Energias Renováveis. 3. Minerais Críticos. 4. Paradoxo Verde. I. Castro, Fernando Ferreira de. II. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.

CDD 333.794

Ficha catalográfica elaborada por Elizabeth Ferreira da Silva CRB-7/6844.

Como citar:

CASTRO, Fernando Ferreira de *et al.* **Transição energética para fontes de energia renováveis e sua dependência por minerais críticos** : aspectos geoeconômicos. Brasília, DF: Ipea, out. 2024. 27 p. : il. (Texto para Discussão, n. 3051). DOI: <http://dx.doi.org/10.38116/td3051-port>

JEL: L71; L72.

DOI: <http://dx.doi.org/10.38116/td3051-port>

As publicações do Ipea estão disponíveis para download gratuito nos formatos PDF (todas) e ePUB (livros e periódicos).

Acesse: <http://www.ipea.gov.br/portal/publicacoes>

As opiniões emitidas nesta publicação são de exclusiva e inteira responsabilidade dos autores, não exprimindo, necessariamente, o ponto de vista do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada ou do Ministério do Planejamento e Orçamento.

É permitida a reprodução deste texto e dos dados nele contidos, desde que citada a fonte. Reproduções para fins comerciais são proibidas.

SUMÁRIO

SINOPSE

ABSTRACT

1 INTRODUÇÃO	7
2 ASPECTOS GEOPOLÍTICOS DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA PARA FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS.....	8
3 DESAFIOS GEOPOLÍTICOS DA TRANSIÇÃO DOS SISTEMAS ENERGÉTICOS: DOS COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS ÀS ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	10
4 MINERAIS CRÍTICOS PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA: AS ENERGIAS LIMPAS E SUA DEPENDÊNCIA POR MATÉRIAS-PRIMAS MINERAIS NÃO RENOVÁVEIS	12
5 ALGUMAS IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS E SOCIAIS DO SETOR MINERAL RELACIONADAS À TRANSIÇÃO ENERGÉTICA PARA FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS.....	18
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	21
REFERÊNCIAS	22

SINOPSE

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 (UE, 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, as empresas e as 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 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 estudo é trazer à tona os aspectos mais emblemáticos desta discussão, com base em uma 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.

Palavras-chave: transição energética; energias renováveis; minerais críticos; paradoxo verde.

ABSTRACT

The recent transformations and technological innovations in the energy sector have been driven by the urgency of the responses needed to deal with climate change at a global level, to which governments and corporations are committed to achieving goals to reduce their emissions in line with the protocols of production systems and pacts updated annually since the Paris Agreement (2016). Among the main initiatives to achieve these goals is the proposal of energy transition to so-called renewable energy sources, which are emerging as sustainable alternatives that are currently technologically viable and economically attractive for countries, companies and individuals. These clean sources, however, depend on an increase in the mineral production of raw materials that have been considered critical due to their locational rigidity and supply risk, since these materials are present in components and equipment for electricity generation, storage and mobility. In addition, the process of transitioning from traditional high-carbon systems to low-carbon systems tends to have an impact on production chains and the installed infrastructure, which has different levels of dependence and risks associated with changes in the traditional fossil fuel-dependent

matrix. The aim of this essay is to bring to light the most emblematic aspects of this discussion, based on an extensive bibliographical review of recent scientific articles and government studies, in order to present the key elements of this debate for understanding the geopolitics of energy in the 21st century.

Keywords: energy transition; renewable energies; critical minerals; green paradox.

1 INTRODUÇÃO

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

De fato, 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. Além disso, fontes renováveis de energia emergem como fontes de geração tecnológica e economicamente viáveis, e se caracterizam como uma alternativa sustentável e factível para os países, as empresas e pessoas.

As tecnologias de geração de energia por fontes limpas se diferem profundamente daquelas que dependem das tradicionais fontes que utilizam hidrocarbonetos e combustíveis fósseis (Blondeel, Bradshaw e Kuzemko, 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 restrição das reservas em produção a determinados territórios – que são fontes de potenciais instabilidades no fornecimento – e também por questões tecnológicas, pois nem sempre é possível a sua imediata substituição por outros materiais (EC, 2020a; Schrijvers *et al.*, 2020).

Realmente, segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), certos bens minerais são fundamentais para a construção dos componentes de captação, armazenamento e transmissão de energia por fontes renováveis, portanto, caracterizam-se como elementos-chave para a emergência e manutenção de cadeias produtivas de baixo carbono (IEA, 2020). Assim, 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 (UE, 2016), que visam reduzir os efeitos da mudança climática mediante redução nas emissões de CO₂ e outros gases, que é considerado um marco recente para a geopolítica da energia no século XXI (Boer, Pescatori e Stuermer, 2021; IEA, 2021; Schrijvers *et al.*, 2020; OECD, 2020; IPCC, 2019).

Apesar disso, essa nova ordem energética que está emergindo também está sujeita a consequências negativas para os sistemas de geração de energia instalados, o que requererá pensar os efeitos da descarbonização, tendo em vista a busca por um processo equilibrado para a transição energética. Além do mais, o aumento da demanda pela extração de determinados minerais para esta transição perpassa desafios ambientais, sociais e políticos nos territórios mineradores globais.

O objetivo deste trabalho é apresentar os aspectos geoeconômicos dessa problemática e lançar luz sobre a temática da transição energética para fontes renováveis e suas consequências sobre o aumento da demanda por recursos minerais, conspicuamente em relação aos denominados minerais críticos e estratégicos (MCEs). Com base em uma extensa revisão bibliográfica sobre o tema, serão apresentados alguns elementos centrais deste debate mundial.

Além desta introdução, este texto reúne outras cinco seções. Na seção 2, apresentam-se as questões geopolíticas relacionadas à transição do sistema energético. Na seção 3, discutem-se os desafios da transição dos combustíveis fósseis para as energias renováveis; na seção 4, amplia-se o debate sobre as fontes de energia limpa e suas dependências por matérias-primas minerais não renováveis. Na seção 5, exploram-se as implicações ambientais e sociais referentes à transição energética; e na última seção, apresentam-se as considerações finais.

2 ASPECTOS GEOPOLÍTICOS DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA PARA FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS

A temática dos MCEs levanta questões geopolíticas e, em particular, geoeconômicas. Como bem ponderam Castro, Peiter e Góes (2021), a crescente tensão ocasionada pela concentração geográfica de algumas matérias-primas (essenciais para as novas tecnologias), tem acirrado disputas geopolíticas que tendem a se acelerar no século XXI, como é o caso evidenciado pelo crescimento e domínio da China neste setor. De fato, evidencia-se que a transição para fontes de energia com baixa emissão de carbono antevê prováveis ganhadores e perdedores geopolíticos no contexto mundial da era pós-covid.

Utilizando um arcabouço teórico da geopolítica, tais disputas surgem no âmbito das tensões entre o expansionismo *mackinderiano* chinês e a contenção *spykmaniana* norte-americana, que coloca, de um lado, a tentativa de manutenção da hegemonia estadunidense (a denominada *pax americana*) e, do outro, a busca pelo sistema multipolar de poder global, notadamente a partir da ascensão da China e do reposicionamento da Rússia. Nesse novo 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 as ameaças e as oportunidades dos MCEs.

Faz-se fundamental compreender a complexidade dessa nova ordem energética mundial insurgente, que se desenvolve em um modelo que combina: i) os impactos da descarbonização da economia nas cadeias de produção global; ii) os desafios tecnológicos do aquecimento global antropogênico; e iii) o jogo geopolítico das grandes potências globais e seus interesses em conflito. Por conseguinte, o estudo da

TEXTO para DISCUSSÃO

geopolítica da energia do século XXI deve contemplar a relação entre 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).

Desse modo, é importante 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 ganhadores/perdedores nessa nova ordem mundial. Portanto, é fundamental compreender e analisar a transição energética, notadamente pela perspectiva da matriz geoeconômica dos minerais críticos.¹

Para a compreensão desse contexto de “dupla transição energética e geopolítica”, é oportuno analisar as ameaças e oportunidades que se apresentam para o desenvolvimento do Brasil em um novo cenário. Nesse contexto, o Brasil deu um passo adiante por meio do Ministério de Minas e Energia (MME), elaborou e disponibilizou a primeira lista de minerais estratégicos para o país (Brasil, 2021). No primeiro trimestre de 2021, o Decreto nº 10.657 (Brasil, 2021a) instituiu o programa pró-minerais estratégicos, pelo qual qualificou 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 está apresentada a seguir.

- 1) Bens minerais que o país depende de seu suprimento para setores econômicos vitais: enxofre, fosfato, potássio, molibdênio.
- 2) 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.
- 3) Bens minerais que o país detém vantagens competitivas e essenciais para a economia: alumínio, cobre, ferro, grafita, ouro, manganês, nióbio, urânio.

1. Nesse sentido, há doutrinadores 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 chamada *pax americana*; G-20 das Finanças Internacionais em tensão com o G-7 (Banco dos Países Desenvolvidos dos Estados Unidos, da Europa e do Japão), Banco Asiático e Banco dos BRICS em mitigação da influência mundial do Fundo Monetário Internacional (FMI) e Banco Mundial, enfraquecimento do dólar americano como referência do sistema financeiro internacional, paralisação da Rodada de Doha de negociação no âmbito da Organização Mundial do Comércio (OMC) em virtude da atuação do G-20 no comércio mundial e muitas outras iniciativas anticíclicas de poder hegemônico.

Na esteira acadêmica de Góes (2021, p. 23), 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 potências do planeta, urge ao estrategista pátrio 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 um lado, a posição de destaque do Brasil no cenário mundial perpassa pelas fontes consideradas limpas, levando em consideração a sua liderança e exemplo de uma matriz energética predominantemente renovável. Por outro lado, o processo de transição dos tradicionais sistemas de alto-carbono para sistemas de baixo-carbono tende a gerar impactos na infraestrutura instalada e nas cadeias produtivas globais. A próxima seção explora os desafios para efetivar a transição entre os sistemas energéticos.

3 DESAFIOS GEOPOLÍTICOS DA TRANSIÇÃO DOS SISTEMAS ENERGÉTICOS: DOS COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS ÀS ENERGIAS RENOVÁVEIS

Até meados dos anos 2000, a questão da transição energética estava envolta por tensões sobre a possível escassez e conseqüente aumento nos preços de venda do petróleo (Hirsch, Bezdek e Wendling, 2005), contudo este cenário se remodelou rapidamente, e hodiernamente vivenciamos um período de relativa abundância de combustíveis fósseis (Klare, 2012). Isso foi possível após avanços no desenvolvimento de novas tecnologias, como a utilização do xisto (Blackwill e O’Sullivan, 2014) e o fraturamento hidráulico (Grigas, 2017), métodos que permitiram novas possibilidades de extração de combustíveis líquidos e gasosos, inclusive em plataformas continentais (como o exemplo do pré-sal brasileiro), colaborando para o achatamento na variação dos custos e o decrescimento na elasticidade do suprimento de óleo e gás (Blondeel, Bradshaw e Kuzemko, 2021).

Tendo por base as prerrogativas do Acordo de Paris (Brasil, 2017; UE, 2016), a redução na utilização de combustíveis fósseis requereria que uma porção significativa dessas reservas não fosse explorada ou consumida, ou seja, para o alcance dessas metas, deve ser considerado que o mundo detém um limite finito na utilização do carbono, o que acarreta repensar os padrões de produção e consumo. Entre algumas tratativas propostas no acordo, discutiu-se a diminuição na produção de petróleo a fim de reduzir suas emissões nos ecossistemas (IEA, 2020; IPCC, 2019).

Sendo assim, essa visão sobre a redução na produção de óleo e gás vem sendo amplamente utilizada em campanhas, como *keep oil in the ground* (deixe o petróleo no chão), *fossil fuel non proliferation treaty* (tratado de não proliferação de combustíveis

TEXTO para DISCUSSÃO

fósseis) e *anti-fracking movement* (movimento contra o fraturamento), entre outras. Tais iniciativas questionam o aumento recente na prospecção e no consumo de combustíveis fósseis, o que retardaria o processo de transição energética para fontes renováveis. Reforçando esta ideia, um estudo recente de 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 à estabilização do aquecimento global abaixo de 1,5°C (IPCC, 2019), entre as quais se estimou que: 85% do carvão, 58% do petróleo e 59% do gás natural devem ser resguardados.

Mas essa 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 à 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 um efeito gerado pelo aumento na oferta em antecipação à 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, Bradshaw e Kuzemko, 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 petróleo e gás (P&G). Além disso, os países que são notadamente produtores de óleo e gás também tendem a ser grandes emissores de CO₂, pois o consumo destes combustíveis está implícito nos seus sistemas energéticos nacionais (Fattouh, 2021).

Tendo em vista os efeitos sobrepostos dessa 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 Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), como Estados Unidos, Canadá e Noruega, possuem capacidades financeiras para absorver as consequências dessa transição (Le Billon e Kristoffersen, 2020; Armstrong, 2020).

Ainda nesse contexto, deve-se mencionar que na Conferência-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança Climática de 2021 (COP26), realizada em Glasgow, mais de duzentos países estabeleceram em documento oficial inúmeros compromissos e consensos, entretanto, o próprio chefe-geral da Organização das Nações Unidas (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 (COP26..., 2021a; 2021b; Schraer e Devlin, 2021; Mufson e Timsit, 2021). Considera-se que a conferência não foi bem-sucedida porque não foram claramente firmados acordos para o alcance de metas ou estratégias a serem realizadas pelos países para uma aceleração de iniciativas que visam à redução do uso de combustíveis fósseis ou para endereçar uma resposta firme à mudança climática.

Desse modo, 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, 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 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 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 estratégicos, sendo, portanto, denominadas por estes e outros fatores como matérias-primas críticas (Castro, Peiter e Góes, 2020; 2021).

No tocante à 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; Calderon *et al.*, 2020; Watari *et al.*, 2019).

Nesse cenário, o setor de mineração tende a se tornar um dos com mais rápida expansão tanto no presente quanto no futuro (IEA, 2021; Boer, Pescatori e Stuermer, 2021; Hund *et al.*, 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” (Bainton *et al.*, 2021; Blondeel, Bradshaw e Kuzemko, 2021; Nate *et al.*, 2021; Calderon *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, Goffé e Arndt, 2013).

Os gargalos para a expansão das fontes de energia limpa estão diretamente ligados à cadeia produtiva de componentes e equipamentos, que, por sua vez, depende da prospecção e do 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 destas matérias-primas, assim como dos países que dominam as tecnologias para a 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 (*photovoltaic*), geradores de energia eólica, células de combustível (*fuel cells*) para a mobilidade elétrica (*e-mobility*), motores de tração elétricos (magnetos permanentes), tecnologias de informação e comunicação (*information and communication technologies – ICTs*), robôs, drones, impressoras 3D, entre outras tecnologias emergentes, depende de uma grande variedade de materiais metálicos com distintas disponibilidades de suprimento. O quadro 1 ilustra as principais matérias-primas ou os materiais vitais para a construção das tecnologias mencionadas.

QUADRO 1**Principais matérias-primas e materiais críticos para a construção das tecnologias estratégicas ligadas à transição energética**

Tecnologias	Matérias-primas e materiais críticos associados
Baterias de íons de lítio (Li-ion)	Matérias-primas: alumínio, cobalto, cobre, estanho, ferro, flúor, fósforo, grafite, lítio, manganês, nióbio, níquel, silício, titânio. Materiais: ânodos, cátodos e eletrólitos.
Células de combustível	Matérias-primas: alumínio, cálcio, caulim, cobalto, cobre, cromo, estrôncio, ferro, grafite, lítio, níquel, paládio, platina, potássio, prata, ródio, rutênio, silício, sódio, titânio, vanádio, zircônio. Materiais: aço inoxidável, fibras de carbono, grafeno, nitreto de boro e outros.
Turbinas eólicas (geradores síncronos e de indução)	Matérias-primas: alumínio, boro, chumbo, cobre, cromo, disprósio, ferro, manganês, molibdênio, neodímio, nióbio, níquel, praseodímio. Materiais: aço-ligas, fibras de carbono, fibras de vidro, magneto de neodímio e outros.
Motores de tração elétrica (magnetos permanentes)	Matérias-primas: alumínio, boro, cobre, cromo, disprósio, ferro, molibdênio, neodímio, níquel, praseodímio, silício. Materiais: aço-ligas, magneto de neodímio, silício metálico e outros.
Painéis fotovoltaicos (PV)	Matérias-primas: alumínio, boro, cádmio, chumbo, cobre, estanho, ferro, gálio, germânio, índio, molibdênio, níquel, prata, selênio, silício, telúrio, zinco. Materiais: polissilício, silício metálica, telureto de cádmio e outros.
Robótica	Matérias-primas: 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. Materiais: aço-ligas, baterias, cerâmicas e vidros especiais, fibras de carbono, liga de níquel-titânio, magnetos, nanotubos, polímeros, semicondutores e outros.
Drones (<i>unmanned aerial vehicles</i> – UAV)	Matérias-primas: 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. Materiais: aços especiais, baterias, fibra de aramida, kevlar, ligas de alumínio, alumínio-magnésio, ferronióbio, níquel-titânio, magnetos, pós-metálicos refratários, semicondutores e outros.
Impressoras 3D (<i>3D printing/additive manufacturing</i>)	Matérias-primas: alumínio, cobalto, cobre, cromo, escândio, ferro, háfnio, magnésio, manganês, molibdênio, nióbio, níquel, silício, titânio, tungstênio, vanádio, zircônio. Materiais: aços inoxidáveis, ligas de alumínio e níquel-titânio, ligas especiais e outros.
ICTs	Matérias-primas: 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. Materiais: diversas ligas metálicas, grafeno, magnetos de neodímio-ferro-boro, semicondutores, materiais citados anteriormente e outros.

Fonte: EC (2020a).

Elaboração dos autores.

TEXTO para DISCUSSÃO

A produção de células de baterias Li-ion se concentra na China, África e América Latina, que são responsáveis por 74% da produção mundial. Nas turbinas eólicas, a China detém quase um monopólio da produção de componentes-chave, que também depende de grandes volumes de ferro e aço-ligas. 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 à disponibilidade de suas reservas para o mercado internacional, onde detém 60% do mercado de motores de tração elétrica (EC, 2020a; 2020b). Dessa 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 implicados na transição para uma economia de baixo carbono, o quadro 2 apresenta um panorama da dependência destes setores, 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 concentrado	Hidrogênio	Eólica	Solar fotovoltaica	Veículos elétricos
Aço										
Cobre										
Alumínio										
Níquel										
Zinco										
Disprósio										
Neodímio										
Praseodímio										
Silício										
Térbio										
Cobalto										
Grafite										
Manganês										
Prata										
Cádmio										
Gálio										
Írídio										
Lítio										
Platina										
Telúrio										
Urânio										

Alto

Médio

Baixo

Fonte: EC (2020a).

Elaboração dos autores.

Nesse cenário de disputa por recursos e manutenção ou busca por inserção nesses novos mercados, a questão estratégica, no tocante à garantia do suprimento de minerais considerados “críticos” para a transição energética, está ligada a três pontos centrais: i) questão climática; ii) competitividade industrial; e iii) segurança nacional (Nakano, 2021; EC, 2020b; Schrijvers *et al.*, 2020). Em relação ao primeiro, nota-se que a questão climática demanda uma premência pela transição energética para fontes consideradas limpas, que por sua vez depende de um incremento na produção de determinados metais. Em consequência, este aumento pode gerar um choque nos preços (*demand shock*) de todas as *commodities* (Boer, Pescatori e Stuermer, 2021; OECD, 2020), o que vem 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 (EC, 2020b).

A questão das matérias-primas “críticas” para a transição energética se desdobra nesta nova fase de rivalidades geopolíticas devido à escassez e ao risco de suprimento desses materiais, somado à crescente importância econômica que suas propriedades especiais e aplicações proporcionam (Girtan *et al.*, 2021). A garantia de inserção neste mercado vem ganhando contornos de uma questão de segurança nacional para as grandes economias, que se veem ameaçadas diante do domínio da China e de outras economias emergentes detentoras de importantes reservas minerais para os países ou blocos consumidores. 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; Schulz *et al.*, 2017; USGS, 2017; Uren, 2019; Barteková e Kemp, 2016).

Além das questões econômicas relacionadas à concentração dos depósitos de minerais críticos e à produção atual e futura, é importante pensar nos riscos sociais e ambientais dessa extração mineral no âmbito local, devido à 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).

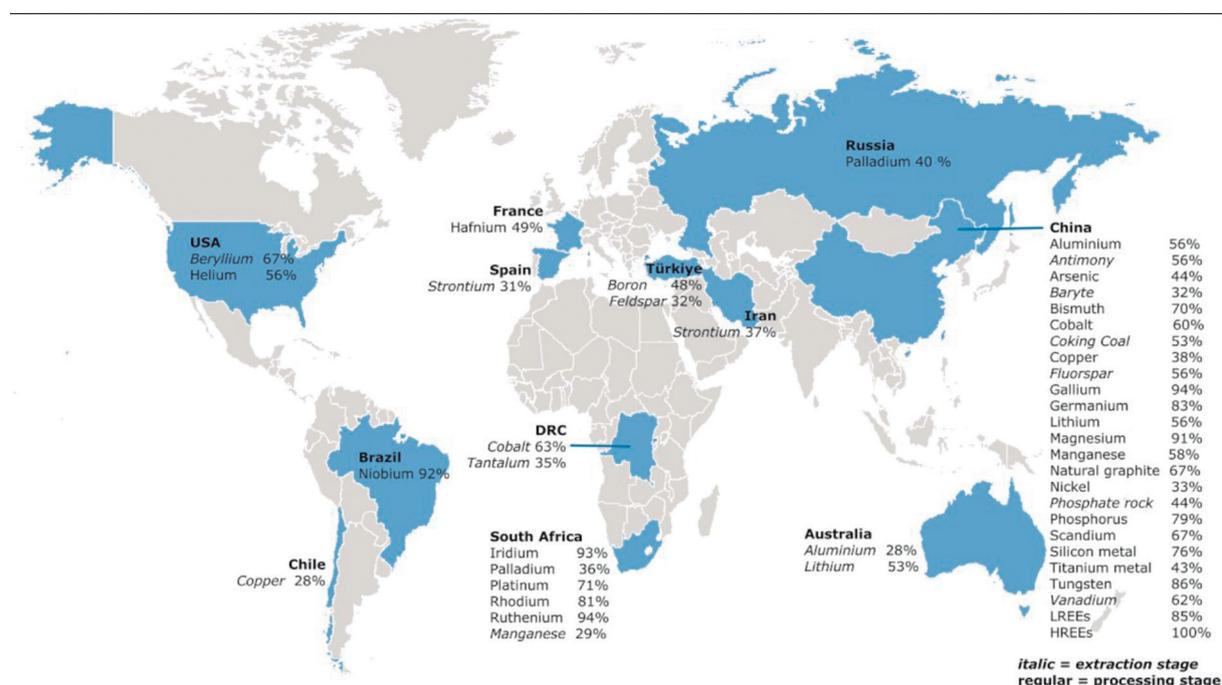
Visando mapear essas possíveis ameaças ao suprimento de matérias-primas, a Comissão Europeia realiza periodicamente estudos sobre a disponibilidade mundial e o risco de suprimento de dezenas de matérias-primas minerais visando identificar quais entre elas devem ser consideradas críticas. A figura 1 apresenta o mapa construído

TEXTO para DISCUSSÃO

pela União Europeia que ilustra os países que concentram as reservas em produção das principais matérias-primas críticas para o bloco europeu.

FIGURA 1

Concentração da disponibilidade de matérias-primas críticas para o bloco europeu, por país fornecedor



Fonte: EC (2023).

Obs.: A figura não pôde ser padronizada e revisada em virtude das condições técnicas dos originais (nota do Editorial).

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. 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 fim da vida útil de seus ciclos de vida (EC, 2018; 2017).

Na próxima seção, serão discutidos aspectos ambientais e conflitos locais envolvidos na produção de alguns materiais críticos necessários à transição energética.

5 ALGUMAS IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS E SOCIAIS DO SETOR MINERAL 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 gerará a possibilidade de aumento de impactos adversos, notadamente ambientais e sociais, nos países fornecedores de recursos minerais de fonte primária.

A mensagem que os autores trazem acerca do manejo de recursos minerais é que não basta a projeção ou busca por mitigação das incertezas quanto à disponibilidade de minerais para a geração de energia renovável, pois devem ser considerados os impactos associados à elevação do fluxo de atividade extrativa mineral (Watari *et al.*, 2019). Se não forem gerenciados de forma adequada, existem fatores ambientais significativos e impactos sociais relacionados à atividade de mineração e ao processamento de minerais que contribuirão para o aumento de conflitos nestas esferas (Lewis e Flynn, 2016).

Entre alguns exemplos frequentemente citados sobre conflitos em territórios produtores ou fornecedores de matérias-primas consideradas críticas (Lèbre *et al.*, 2020; Owen *et al.*, 2020), destaca-se a mineração do cobalto na República Democrática do Congo que tem contribuído para o aumento de conflitos sociais, tais como: o trabalho infantil, a baixa remuneração e a dependência econômica da atividade; e questões ambientais, tais como: desflorestamento local, poluição por resíduos de mineração, erosão e assoreamento, além de emissão de gases e também contaminação de cursos hídricos pela falta de estratégias preventivas e utilização de tecnologias adequadas. Outros casos relevantes são: i) o da mineração de cobre, matéria-prima necessária para fios elétricos e circuitos, células solares de película fina; e ii) 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, a moagem, o refino e o 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

TEXTO para DISCUSSÃO

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 IEA elaborou o quadro 3, 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

Temas	Desafio
Mudança climática	A produção de minerais ligados à transição energética pode ser uma fonte significativa de emissão de gases de efeito estufa (GEEs) à medida que a demanda aumenta, posto que, para sua prospecção, a intensidade de emissões é mais alta do que a de outros metais.
Uso da terra	A mineração traz grandes mudanças na cobertura do solo que podem ter impactos adversos na biodiversidade e nas comunidades.
Uso da água	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.
Resíduos	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).
Governança	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.
Saúde e segurança	Os trabalhadores enfrentam más condições de trabalho e riscos no local de trabalho (por exemplo: acidentes, exposição a produtos químicos tóxicos).
Direitos humanos	A exploração mineral pode levar a impactos adversos na população local, como trabalho infantil ou forçado.

Fonte: IEA (2021).

Elaboração dos 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 sua vez, 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, Bradshaw e Kuzemko, 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 fim 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, Fodha e Ricci, 2020).

Em termos de metais utilizados na composição desses equipamentos ou da infraestrutura voltada à 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, Fodha e Ricci, 2020). Deve-se notar ainda que alguns metais possuem baixos índices de recuperação, como o caso do nióbio.

Do ponto de vista da modelagem sobre o nível de dependência do suprimento de metais para alavancar a transição energética, os autores antes citados 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 sistema.

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 CO₂ contido nos GEEs em produtos de maior valor agregado e, assim, proporcionar a descarbonização até mesmo dos setores tradicionalmente emissores de GEE.

É importante observar que o hidrogênio não é uma fonte de energia e sim um portador de energia, logo, deve ser produzido a partir de outra fonte de energia. Existem

diferentes formas para sua produção e por isso vem sendo consideradas diferentes terminologias, 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 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 CO₂ 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 tradicionais quanto inovadores de alta tecnologia (IRENA, 2019; OECD, 2020). 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 avaliação técnico-econômica consistente da integração do gás reciclado em uma cadeia de abastecimento.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

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

Apesar disso, essa transição não será facilmente negociável frente aos arranjos institucionais enraizados numa matriz energética à 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. Adicionalmente, 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 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), podem ser elencadas seis paradigmas centrais: i) redução dos custos de produção; ii) endereçamento de respostas aos problemas de poluição e à mudança climática; iii) metas pactuadas entre os países para aumento da participação das energias renováveis nas matrizes energéticas nacionais; iv) incentivo à inovação tecnológica; v) engajamento de ações e soluções a partir de grandes investidores e corporações para a sociedade; e vi) fortalecimento das iniciativas oriundas da sociedade civil organizada para o engajamento cidadão na questão do clima e na redução da poluição (Irena, 2019).

Este estudo introduziu o leitor nessa complexa discussão sobre a relação entre a transição energética para fontes de energia renováveis e sua dependência por minerais críticos. Para tal, realizou-se um extenso levantamento de pesquisas atuais a fim de estimular o pensamento crítico com alguns dos argumentos mais emblemáticos sobre essa questão, tendo em vista a premência de se repensar as estratégias e iniciativas brasileiras, em âmbitos locais e globais, nacional e internacional, para assegurar vias de sustentabilidade às nossas gerações futuras.

Conclusivamente, destacamos que as tecnologias de geração de energia renovável intensificarão a demanda de produção e o uso de metais, muitos dos quais possuem elevada escala de produção ou são classificados atualmente como críticos, ressaltando-se que cada vez mais tornar-se-á indissociável a conexão entre os setores de geração de energia e de produção mineral para o avanço tecnológico. Do ponto de vista da geoeconomia, o Brasil se encontra em posição de destaque nesse cenário, tanto como produtor mineral, quanto potencial fornecedor de tecnologias.

REFERÊNCIAS

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

BAI, J. *et al.* Evaluation of resource and environmental carrying capacity in rare earth mining areas in China. **Scientific Reports**, v. 12, 2022.

BAINTON, N. *et al.* The energy-extractives nexus and the just transition. **Sustainable Development**, v. 29, n. 4, p. 624-634, jul.-ago. 2021.

BARTEKOVÁ, E.; KEMP, R. **Critical raw material strategies in different world regions**. Maastricht: United Nations University; Maastricht University, 21 jan. 2016. (Working Paper Series, n. 2016-005).

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

TEXTO para DISCUSSÃO

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

BOER, L.; PESCATORI, A.; STUERMER, M. (Org.). **Energy transition metals**. Washington: IMF, out. 2021. (IMF Working Paper, n. 21/243).

BRASIL. Decreto nº 9.073, de 5 de junho de 2017. Promulga o Acordo de Paris sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima, celebrado em Paris, em 12 de dezembro de 2015, e firmado em Nova Iorque, em 22 de abril de 2016. **Diário Oficial da União**, Brasília, p. 3, 6 jun. 2017. Seção 1.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. 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 da União**, Brasília, p. 103, 22 jun. 2021. Seção 1.

CALDERON, J. L. *et al.* Responsible or reckless? A critical review of the environmental and climate assessments of mineral supply chains. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 10, 2020.

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**, Brasília, n. 24, p. 349-378, dez. 2020.

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

COP26 closes with 'compromise' deal on climate, but it's not enough, says UN chief. **UN News**, 2021a. Disponível em: <https://news.un.org/en/story/2021/11/1105792>. Acesso em: 13 dez. 2021.

COP26 ends with agreement but falls short on climate action. **UNEP**, 2021b. Disponível em: <https://www.unep.org/news-and-stories/story/cop26-ends-agreement-falls-short-climate-action>. Acesso em: 13 nov. 2021.

EC – EUROPEAN COMMISSION. **2017 list of critical raw materials for the UE**. Comunicação 0490/2017. Bruxelas: EC, 2017. Disponível em: EUR-Lex – Access to European Union law – choose your language legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52017DC0490. Acesso em: 20 out. 2024.

EC – EUROPEAN COMMISSION. **Report on critical raw materials and the circular economy**. Luxemburgo: Publications Office of the European Union, 2018.

EC – EUROPEAN COMMISSION. **Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU** – a foresight study. Luxemburgo: Publications Office of the European Union, 2020a.

EC – EUROPEAN COMMISSION. **Critical raw materials resilience**: charting a path towards greater security and sustainability. Bruxelas: EC, 2020b. (COM, n. 2020/474).

EC – EUROPEAN COMMISSION. **Study on the critical raw materials for the EU** – final report. Luxemburgo: Publications Office of the European Union, 2023.

ELIZÁRIO, S. *et al.* **Economia Circular**: o papel do hidrogênio rumo à transição energética. Rio de Janeiro: UFRJ, jul. 2021.

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

FATTOUH, B. **Saudi oil policy**: continuity and change in the era of the **energy transition**. Oxford: Oxford Institute for Energy Studies; Londres: UK Energy Research Centre, 2021.

GIRTAN, M. *et al.* The critical raw materials issue between scarcity, supply risk, and unique properties, **Materials**, v. 14, n. 8, p. 1826-1844. 2021.

GIURCO, D. *et al.* Responsible mineral and energy futures: views at the nexus. **Journal of Cleaner Production**, v. 84, p. 322-328, dez. 2014.

GÓES, G. S. (Org.). **A geopolítica da energia no século XXI**. Rio de Janeiro: Synergia. 2021. 392 p.

GRIGAS, A. **The new geopolitics of natural gas**. Cambridge, Estados Unidos: Harvard University Press, 24 abr. 2017.

HERTWICH, E. G. *et al.* Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies. **PNAS**, v. 112, n. 20, p. 6277-6282, 19 maio 2015.

HIRSCH, R.F.; BEZDEK, R.; WENDLING, R. **Peaking of world oil production**: impact, mitigation and risk management. Tennessee: Office of Scientific and Technical Information, fev. 2005.

HUND, K. *et al.* Minerals for climate action: the mineral intensity of the clean energy transition. Washington: World Bank, 2020.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2020**. Paris: IEA Publications, out. 2020.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **The role of critical minerals in clean energy transitions**. Paris: IEA Publications, maio 2021. (World Energy Outlook Special Report).

IPCC – PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Aquecimento global de 1,5°C**. Brasília: MCTIC, jul. 2019.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **A New World: the geopolitics of the energy transformation**. [s.l.]: Global Commission on the Geopolitics of Energy Transformation; Irena, 2019.

KLARE, M. T. **The race for what's left: the global scramble for the world's last resources**. Nova York: Metropolitan Books, 2012.

KONING, A. *et al.* Metal supply constraints for a low-carbon economy? **Resources, Conservation & Recycling**, v. 129, p. 202-208, fev. 2018.

LE BILLON, 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, set. 2020.

LÈBRE, É. *et al.* The social and environmental complexities of extracting energy transition metals. **Nature Communications**, v. 11, 2020.

LEWIS, B.; FLYNN, S. **Atlas: mapeando os objetivos de desenvolvimento sustentável na mineração**. Genebra: Fórum Econômico Mundial, jul. 2016.

MCLELLAN, B. C. *et al.* 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. **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, jul. 2014.

NAKANO, J. **The geopolitics of critical minerals supply chains**. Washington: CSIS, mar. 2021.

NATE, S. *et al.* Mineral policy within the framework of limited critical resources and a green energy transition. **Energies**, v. 14, n. 9, 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**. Paris: OECD Publishing, 2020.

OWEN, J. R. *et al.* Catastrophic tailings dam failures and disaster risk disclosure. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 42, jan. 2020.

SCHLÖR, H. *et al.* The energy-mineral-society nexus – a social LCA model. **Applied Energy**, v. 228, p. 999-1008, 15 out. 2018.

SCHRAER, R.; DEVLIN, K. COP26: the truth behind the new climate change denial. **BBC**, 16 nov. 2021. Disponível em: <https://www.bbc.com/news/science-environment-59251912>. Acesso em: 14 dez. 2021.

SCHRIJVERS, D. *et al.* **Material criticality**: an overview for decision makers. Bruxelas: IRTC, 2020.

SCHULZ, K. J. *et al.* (Ed.). **Critical mineral resources of the United States: economic and environmental geology and prospects for future supply**. Reston: USGS, 2017. (Professional Paper, n. 1802).

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

STANDAERT, M. China wrestles with the toxic aftermath of rare earth mining. **Yale Environment 360**, 2 jul. 2019.

TOKIMATSU, K. *et al.* 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, dez. 2017.

UE – UNIÃO EUROPEIA. Acordo de Paris. **Jornal Oficial da União Europeia**, ano 59, n. L-282, p. 4-18, 19 out. 2016.

UREN, D. **A quest for global dominance**: China's appetite for rare earths. [online]. The strategist. 2019. Disponível em: <https://www.aspistrategist.org.au/a-quest-for-global-dominance-chinas-appetite-for-rare-earths/>. Acesso em: 20 out. 2024.

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Tracking critical minerals to ensure national preparedness. **USGS**, 16 jan. 2017. Disponível em: <https://www.usgs.gov/news/tracking-critical-minerals-ensure-national-preparedness>. Acesso em: 15 dez. 2021.

VAN DER GRAAF, T. *et al.* The new oil? The geopolitics and international governance of hydrogen. **Energy Research & Social Science**, v. 70, dez. 2020.

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

VIDAL, O. *et al.* Global trends in metal consumption and supply: the raw material-energy nexus. **Elements**, v. 13, n. 5, p. 319-324, 1º out. 2017.

TEXTO para DISCUSSÃO

WATARI, T. *et al.* Total material requirement for the global energy transition to 2050: a focus on transport and electricity. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 148, p. 91-103, 2019.

WELSBY, D. *et al.* Unextractable fossil fuels in a 1,5°C world. **Nature**, v. 597, p. 230-234, 9 set. 2021.

WORLD BANK. **The growing role of minerals and metals for a low carbon future.** Washington: World Bank, jun. 2017.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

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

Ipea – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

EDITORIAL

Coordenação

Aeromilson Trajano de Mesquita

Assistentes da Coordenação

Rafael Augusto Ferreira Cardoso

Samuel Elias de Souza

Supervisão

Ana Clara Escórcio Xavier

Everson da Silva Moura

Revisão

Alice Souza Lopes

Amanda Ramos Marques Honorio

Barbara de Castro

Cayo César Freire Feliciano

Cláudio Passos de Oliveira

Clícia Silveira Rodrigues

Denise Pimenta de Oliveira

Nayane Santos Rodrigues

Olavo Mesquita de Carvalho

Reginaldo da Silva Domingos

Susana Souza Brito

Yally Schayany Tavares Teixeira

Jennyfer Alves de Carvalho (estagiária)

Katarinne Fabrizzi Maciel do Couto (estagiária)

Editoração

Anderson Silva Reis

Augusto Lopes dos Santos Borges

Cristiano Ferreira de Araújo

Daniel Alves Tavares

Danielle de Oliveira Ayres

Leonardo Hideki Higa

Capa

Aline Cristine Torres da Silva Martins

Projeto Gráfico

Aline Cristine Torres da Silva Martins

The manuscripts in languages other than Portuguese published herein have not been proofread.

Ipea – Brasília

Setor de Edifícios Públicos Sul 702/902, Bloco C

Centro Empresarial Brasília 50, Torre B

CEP: 70390-025, Asa Sul, Brasília-DF

Missão do Ipea
Aprimorar as políticas públicas essenciais ao desenvolvimento brasileiro por meio da produção e disseminação de conhecimentos e da assessoria ao Estado nas suas decisões estratégicas.