

Transição da Segurança Energética: energias limpas, minerais críticos e novas dependências

Victor Gaspar Filho ^I
Thauan Santos ^{II}

Resumo: Dinâmicas distintas podem ser observadas entre os mercados de energias renováveis e fósseis, sugerindo a necessidade de abordagens diversas no campo teórico e prático da segurança energética. Entretanto, no contexto da atual transição energética, observa-se uma concentração geográfica das cadeias produtivas dos novos equipamentos geradores de energias limpas, o que cria novas dependências por insumos e parceiros comerciais. Consequentemente, a segurança energética é afetada pela sua relação com insumos não-energéticos, como minerais críticos. Neste artigo, empreende-se uma pesquisa documental para posterior análise quantitativa dos dados da United States Geological Survey (USGS). Após a apresentação da discussão teórica acerca da segurança energética, da transição energética e de minerais críticos, analisamos documentos dos setores energético e mineral redigidos no recorte temporal de 2000 a 2020. Conclui-se que a transição em direção a matrizes energéticas menos poluentes pode resultar na criação de novas dependências e que o acesso a recursos não energéticos é condicionante para o êxito do processo de transição energética.

Palavras-chave: Segurança energética; transição energética; energia; minerais críticos; mineral; recursos naturais.

São Paulo. Vol. 25, 2022

Artigo Original

DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoc20210179r1vu2022L4AO>

^I Núcleo de Avaliação da Conjuntura, Escola de Guerra Naval, Rio de Janeiro, RJ, Brasil e Instituto Brasil-União Europeia (FECAP). São Paulo, SP, Brasil.

^{II} Programa de Pós-Graduação em Estudos Marítimos da Escola de Guerra Naval (PPGEM/EGN) e Grupo Economia do Mar (GEM). Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Introdução

Segurança energética é imprescindível para que haja segurança humana. Podemos enxergar a energia não somente como uma commodity, mas uma pré-condição para todas as commodities: um fator básico equivalente ao ar, à água e à terra (SCHUMACHER, 1977 *apud* SOVACOOOL; MUKHERJEE, 2011). O imperativo de obter tais recursos pode exercer influência significativa sobre as políticas externa e de segurança de um Estado. Da mesma forma, aqueles que possuem recursos energéticos necessários ou cobiçados por outros podem utilizá-los como ferramentas de políticas de segurança nacional ou ainda como armas políticas (DUFFIELD, 2010).

A partir de análise de literatura dos campos da segurança internacional, segurança energética, transição energética e dos minerais críticos, a contribuição teórica e conceitual do presente artigo reside na apresentação dos insumos minerais não-energéticos como um gargalo para a produção de equipamentos destinados à geração de energias limpas, oferecendo uma perspectiva de que novas dependências podem ser despertadas a partir da transição energética, com novos impactos na segurança energética dos atores. Observada a concentração da produção de recursos minerais, o acesso a estes se torna uma condicionante para o êxito de uma transição energética que garanta a segurança energética de um Estado. Procuramos, assim, propor a existência de umnexo entre minerais não-energéticos e segurança energética, correspondendo a um novo marco teórico nos estudos de segurança energética.

A literatura tradicionalmente elaborada no campo da segurança energética é centrada em recursos fósseis. Contudo, os diversos equipamentos envolvidos na geração de energias renováveis dependem do fornecimento abundante de minerais considerados críticos para diferentes atores, como cobre, lítio, cobalto e terras raras (IEA, 2021).

Em trabalhos como “Critical Minerals and Energy—Impacts and Limitations of Moving to Unconventional Resources” (McLELLAN *et al.*, 2016) ou “Analyses de la disponibilité économique des métaux rares dans le cadre de la transition énergétique” (FIZAINE, 2014) vemos aportes essenciais à discussão tratada neste artigo, mas que focam em etapas diferentes do nexo aqui proposto. Obras importantes são trazidas para explicar a formulação do *nexo minerais não energéticos-segurança energética*, para concatenarmos essas obras anteriores e oferecermos uma nova contribuição para o campo.

Utilizamos os minerais de terras-raras como *proxy* para a discussão sobre minerais críticos, trabalhando-as em grupo, através de dados da United States Geological Survey (USGS), visto o reconhecimento da criticalidade destes dezessete elementos, bem como o seu tratamento coletivo por governos e por todas as obras relativas a minerais aqui discutidas. A escolha do parâmetro também se deu devido ao histórico de oscilações de preços, concentração de mercado e motivações políticas por trás de ações governamentais envolvidas no mercado destes minerais. Os dados minerais dialogam com projeções retiradas de relatórios do setor energético publicados pela International Renewable Energy Agency (IRENA) e pela International Energy Agency (IEA) de forma a identificarmos a relação entre os objetos do *nexo segurança energética-minerais críticos não-energéticos*.

O artigo se divide em cinco seções principais: inicialmente, discutimos os concei-

tos de segurança internacional e segurança energética a partir de arcabouço teórico de diferentes autores como Buzan, Sovacool, Raphael e Stokes, para em seguida apresentar o debate acerca da criticalidade dos minerais. Após, construímos uma série histórica do mercado internacional de terras-raras utilizando dados da USGS, prosseguindo para uma discussão sobre o nexos proposto, confrontando dados do setor mineral e energético. Ao final, tecemos considerações sobre o tema.

Segurança e transição energéticas

No contexto da segurança energética, a possibilidade de existência de uma definição singular é remota, uma vez que se trata necessariamente de um conceito interdisciplinar que dialoga com a economia, a geografia, e com áreas técnicas do campo energético. Por vezes, estudos se baseiam em definições incompletas ou inconsistentes de segurança energética focadas em aspectos técnicos e econômicos, como a segurança da oferta de combustíveis fósseis ou preços ao consumidor, excluindo fatores sociopolíticos como governança (SOVACOO, 2013) e ambientais/climáticos (SANTOS, 2018).

Raphael e Stokes (2010) descrevem a segurança energética como uma interseção de uma série de tendências, como a demanda global por energia, receio de uma oferta declinante de energia, instabilidade em regiões exportadoras de combustíveis e preocupação acerca do esgotamento de recursos ou com mudanças climáticas. Distingões são encontradas entre definições propostas por estudos quantitativos e qualitativos. No primeiro caso, a segurança energética pode ser mensurada através de indicadores como intensidade energética ou nível de preços. Em estudos qualitativos, exploram-se fatores como geopolítica e governança (ANG *et al.*, 2015). Ademais, destacamos que o conceito é diverso ao analisar países desenvolvidos e em desenvolvimento (SANTOS, 2018).

Buscar a segurança energética de um Estado é um objetivo complexo que perpassa questões sobre como prover serviços energéticos justos, acessíveis, fiáveis, eficientes, ambientalmente benignos, devidamente governados e socialmente aceitos (SOVACOO; MUKHERJEE, 2011). Insegurança energética pode emergir por diversos fatores, como instabilidade geopolítica, desastres naturais, terrorismo, desenho regulatório precário ou falta de investimentos (REDGWELL, 2004 *apud* ÖZDAMAR, 2010). Raphael e Stokes (2010) apontam que, em uma tentativa de estabilizar a oferta, grandes potências estão gradativamente militarizando sua abordagem para garantir a segurança energética.

A segurança energética tende a englobar cinco dimensões divididas em 20 componentes de forma a possibilitar a elaboração de um índice, quais sejam: 1) disponibilidade energética, composta de segurança da oferta e produção, dependência e diversificação; 2) acessibilidade dos preços, composta de estabilidade dos preços, acesso e equidade, descentralização e preços baixos; 3) desenvolvimento tecnológico, constituído de inovação e pesquisa, segurança e fiabilidade, resiliência, eficiência energética e investimento; 4) sustentabilidade, pautada no uso de terras, água, mudanças climáticas e poluição do ar; e 5) regulação, constituída de governança, comércio, competição e conhecimento (SOVACOO; MUKHERJEE, 2011).

Quatro principais benefícios analíticos derivariam da metodologia proposta pelos autores: a abordagem multidimensional Trata-se de um incentivo ao afastamento de descrições estreitas como meramente a segurança da oferta de combustíveis fósseis. Similarmente, uma sistematização pode prover dados a políticas energéticas e construir capacidade institucional. Indicadores e métricas verificáveis podem ser úteis ao garantir aos analistas a possibilidade de encontrar soluções energéticas mais apropriadas. Também possibilitam a identificação de performances de segurança energética individuais ao longo do tempo, podendo relacioná-las com grandes eventos como embargos, conflitos militares ou a introdução de tecnologias ou políticas disruptivas. Ademais, um índice ajudaria a identificar *trade-offs* perpassando diferentes dimensões envolvidas e áreas passíveis de aprimoramento, possibilitando elevar a compreensão da complementaridade entre as cinco dimensões identificadas (SOVACOOOL, 2013).

Semelhantemente, Ang *et al.* (2015) elencaram sete principais conceitos encontrados em suas pesquisas, afirmando que quanto menos indicadores são utilizados no conjunto escolhido para a mensuração da segurança energética, mais o resultado está suscetível a variações em um dos indicadores. Os critérios em ordem decrescente de ocorrência na pesquisa são: 1) disponibilidade energética; 2) infraestrutura; 3) nível de preços no mercado energético; 4) efeitos sociais; 5) ambiente; 6) governança; e 7) eficiência energética.

Relativamente à transição energética, a compreensão clássica engloba mudanças no suprimento nacional de energia ou a descoberta de novos recursos energéticos. Na atualidade, também são incluídas transformações na logística do mercado energético, em aparelhos utilizados pelo consumidor final e em sistemas utilizados nas redes elétricas (GRUBLER *et al.*, 2016; SOVACOOOL, 2016; BAZILIAN; SOVACOOOL; MOSS, 2017). Ela pode ser a consequência de transformações tecnológicas e econômicas, bem como de decisões políticas (SABBATELLA; SANTOS, 2020).

No contexto de uma transição energética limpa (SABBATELLA; SANTOS, 2020), a dinâmica do fornecimento energético também tende a se alterar. Para Arent *et al.* (2017), a transição para matrizes limpas pode oferecer uma perspectiva de elevação da segurança energética de um ator (em especial em países em desenvolvimento) uma vez que ele deixe de ser dependente da importação de combustíveis. Ladislaw, Carey e Bright (2019) apontam a possibilidade de em 2050 haver cinco vezes a quantidade de instalações de plantas de energia solar fotovoltaica e três vezes a quantidade de plantas de energia eólica internacionalmente. A Agência Internacional de Energia (IEA, 2021) estima que em 2040 veremos um aumento de 40% na porção de energias renováveis utilizadas no mundo.

Fouquet e Pearson (2012) descrevem a transição energética como uma mudança de um sistema econômico dependente de uma ou uma série de fontes energéticas e tecnologias para outro. A transição energética não se reduz à dinâmica existente entre tecnologias e sistemas. Ela envolve atores sociais que podem promover ou dificultar o processo de mudança, observadas diferentes estruturas culturais e valorativas, como preocupações socioambientais (PARKER, 2018).

Enquanto matrizes energéticas sempre estiveram em transição, a sofisticação de

sistemas tecnológicos, o comércio energético a nível global, a grande quantidade de custos irreversíveis e a urgência das mudanças climáticas determinam a complexidade, a escala e o ritmo da atual transição energética (SINGHA *et al.*, 2019). Energias renováveis alteram as arenas de inte(g)ração de energias, transformando mercados e modificando parceiros comerciais e padrões de cooperação e conflito entre países (SCHOLTEN *et al.*, 2019).

O incentivo à transição para matrizes limpas se fortaleceu não somente em virtude dos benefícios percebidos na redução da pegada de carbono, como também pelo desejo de se reduzir a dependência de outros países (HENSEL, 2011). Energias renováveis garantiriam aos importadores de combustíveis fósseis uma forma de diversificação de sua matriz energética e mais autonomia diante do mercado energético global (SCHOLTEN *et al.*, 2019).

Scholten *et al.* (2019) e Arent *et al.* (2017) apontam que a transição em direção a recursos mais geograficamente dispersos sugere um deslocamento rumo a um mercado global menos oligopolístico. A maior parte dos países possui algum tipo de energia renovável disponível, que os coloca diante de um *trade-off* que consiste em optar entre uma produção doméstica segura ou importações a preços baixos, eclipsando a distinção entre importadores e exportadores (SCHOLTEN *et al.*, 2019). Inovação institucional no campo político e mercadológico se desdobra a partir da queda dos custos de tecnologias de baixo-carbono, interagindo com uma série de atores, influenciando a Economia Política das transições energéticas (ARENT *et al.*, 2017).

Muitas tecnologias geradoras de energias renováveis já são competitivas com combustíveis fósseis em termos de custos. Isso, somado às potenciais contribuições para a redução da poluição e consequente desaceleração das mudanças climáticas, criaria uma propensão para a transição energética global diante da opinião pública, do mercado e dos governos (IRENA, 2019a).

Desde 2010, o custo médio da eletricidade gerada pela energia solar fotovoltaica (PV) e eólica diminuiu 73% e 22%, respectivamente. A IRENA (2019a) estima que até 2025 o custo médio ponderado global da eletricidade pode cair 26% com a energia eólica *onshore*; em 35% com a energia eólica *offshore*; em pelo menos 37% com as tecnologias de energia solar concentrada; e em 59% com a energia solar PV.

Dentre os fatores limitantes para uma transição energética para energias limpas, destacamos os minerais utilizados na infraestrutura necessária à geração de energia. Sugere-se que países podem se tornar importadores de equipamentos de atores externos que, alcançando protagonismo do setor de energias limpas, tornariam-se *price makers* desse segmento tecnológico.

Minerais críticos

Atualmente, poucas tecnologias de produção de energias limpas não utilizam metais raros em alguma etapa de sua cadeia produtiva (FIZAINÉ, 2014). Como nos conceitos abordados anteriormente, não há uma definição ou metodologia unânime para a categorização de minerais como críticos (JIN; KIM; GUILLAUME, 2016). Alguns dos

critérios para designar um elemento como crítico são: escassez física, centralização política da oferta, preços elevados ou dependência econômica (MCLELLAN *et al.*, 2016). Forte concentração geográfica na produção, pouca reciclagem de materiais por falta de incentivos, mercados pequenos associados a forte volatilidade da produção ou demanda, incerteza provocada pela falta de indicadores precisos sobre o esgotamento dos recursos também são critérios associados à criticalidade (FIZAINE, 2014). É um conceito relativo capaz de determinar quais metais são mais sujeitos a rupturas em seu fornecimento (JIN; KIM; GUILLAUME, 2016).

A classificação desses recursos não tem caráter estático e tende a se modificar caso haja mudanças das condições econômicas subjacentes. Ao contrário de outras taxonomias aplicadas aos minerais, esta em questão, por ser dotada de caráter econômico, está sujeita a mudanças constantes (FIZAINE, 2014). Recursos minerais são geologicamente determinados, porém socialmente mediados (SOVACOOOL *et al.*, 2020). Para Jenkin *et al.* (2015), a importância econômica e o risco na oferta são os principais fatores de definição de um mineral como crítico. Outros fatores considerados pelos autores são a abundância do recurso na crosta terrestre, fatores sociais e também geopolíticos.

A maioria das metodologias existentes compartilha de uma mesma característica essencial: a criticalidade é mensurada como função de alguma estimativa da probabilidade de rupturas na oferta e uma estimativa das consequências disto (LØVIK; HAGELÜKEN; WÄGERA, 2018). Fatores não-geológicos também podem contribuir para o aprimoramento dos processos mencionados, como mudanças nos cenários políticos e infraestrutura existente (JENKIN *et al.*, 2015). Apesar de poder-se aplicar o Index Herfindahl-Hirschman (HHI)¹ de forma a medir a parcela de produção de um determinado produto por um determinado Estado em um mercado, uma análise posterior deve considerar os riscos políticos associados (HESHMATI; ABOLHOSSEINE, 2017).

Segundo Özdemiroğlu (1993), um indicador que desempenhe corretamente seu papel de alerta de escassez exige o cumprimento de três pré-requisitos:

Deve refletir a escassez passada do recurso, mas acima de tudo antever a evolução da escassez futura e, portanto, ser um indicador precoce da escassez;

Deve ser comparável para permitir avaliações do nível de escassez de vários recursos substituíveis; e

Deve ser calculável, ou seja, deve se beneficiar da coleta de dados e de um método de cálculo simples e confiável.

O risco de ruptura do fornecimento de um mineral é avaliado por diversos critérios e caso esse seja apresentado como alto da mesma forma que sua essencialidade à cadeia de produção de determinados equipamentos essenciais, ele pode ser considerado como crítico. Alguns autores utilizam “crítico”, “estratégico” ou “escasso” como termos intercambiáveis. A criticidade de um mineral, contudo, não é definida estritamente pelo seu caráter estratégico. A metodologia para se identificar minerais críticos e estratégicos é

1 - Índice de competitividade responsável por calcular a parcela de atuação de uma empresa em um determinado mercado (RHOADES, 1993).

semelhante, mas suas avaliações são distintas. Minerais críticos são essenciais às cadeias de valor de uma economia nacional, de um setor ou de uma empresa e não por sua aplicação militar, como comumente observado no caso dos minerais estratégicos (FIZAINE, 2014).

A temática da disponibilidade dos recursos minerais possui menos destaque no final dos anos 1980 em virtude de uma baixa generalizada dos preços das commodities. A partir dos anos 2000, com a elevação do nível de preços, o tema volta a ganhar evidência (FIZAINE, 2014). O levantamento de dados acerca do ciclo de vida dos recursos minerais será essencial para a estimativa de criticidade desses metais bem como análises de fluxo dos materiais, utilizadas para planejamento de longo prazo e redação de políticas relacionadas à segurança da oferta de minerais para contornar cenários de escassez desses recursos minerais (JENKIN *et al.*, 2015).

Lusty e Gunn (2015) apontam que há um cenário de escassez técnica no fato da extração de alguns metais ser realizada como subproduto de outros. Nesse caso, mecanismos de oferta e demanda do mercado podem não ser eficazes no alívio da escassez. Recursos não-convencionais ou novas regiões (Ártico, Antártica e leito oceânico) são alternativas de fontes de recursos críticos com possibilidade de atender à demanda principalmente do aumento populacional (FIZAINE, 2014). O armazenamento estratégico, quando aplicável, também pode ajudar os países a resistir a interrupções no fornecimento de curto prazo (IEA, 2021).

Para alguns metais críticos com baixa abundância na crosta terrestre e utilizados em pequenas quantidades, a descoberta de novos tipos de depósito ou novas tecnologias de exploração podem impactar significativamente a oferta. Entretanto, apesar dos avanços em tecnologias de sensoriamento, os últimos 50 anos observaram um declínio na descoberta de grandes depósitos (JENKIN *et al.*, 2015).

A análise das principais minas que entraram em operação entre 2010 e 2019 mostra que levou 16,5 anos em média para desenvolver projetos desde a descoberta até a produção (S&P GLOBAL, 2020; *apud* IEA, 2021). Pode-se enxergar um *trade-off* existente no mercado de minerais críticos que diz respeito ao equilíbrio entre independência na produção de minerais e competitividade. Isto se dá pela necessidade de capital inicial significativa para tornar viáveis determinados empreendimentos mineradores e de processamento e refino.

Metodologia

O recorte temporal do trabalho é definido entre os anos de 2000 e 2020, abarcando relatórios de agências voltadas ao setor energético como a IRENA e a IEA com foco na elaboração de cenários atinentes ao setor renovável. Examinamos dados relativos ao setor mineral global dentro do recorte proposto a partir de 20 relatórios anuais elaborados pela USGS em formato pdf e xls.

A IRENA (2019a) qualifica os minerais essenciais à fabricação de equipamentos geradores de energias limpas. São eles:

Aplicados à geração de energia solar: bauxita e alumínio, cádmio, cobre, estanho,

gálio, germânio, índio, ferro, chumbo, níquel, selênio, silício, prata, telúrio e zinco.

Aplicados à geração de energia eólica: bauxita e alumínio, cromo, cobalto, cobre, ferro, chumbo, manganês, molibdênio, terras-raras e zinco.

A partir da compilação e análise dos dados disponíveis nos relatórios da USGS, buscou-se reconhecer informações relevantes acerca das reservas, produções e nível de preços no mercado de terras-raras. Identificamos a complementaridade do setor energético e de mineração, utilizando as terras-raras como parâmetro de pesquisa para a proposição do nexos segurança energética-minerais críticos não-energéticos através da essencialidade dos recursos minerais à transição energética.

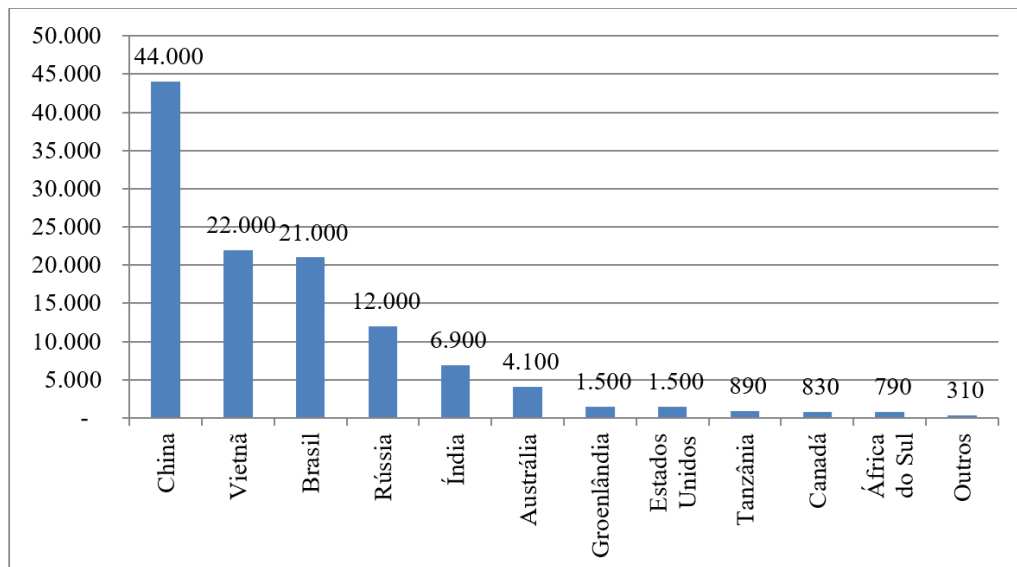
Os arquivos em formato xls sobre terras-raras, mais detalhados que aqueles em formato pdf, tiveram sua última publicação em 2017. Buscamos assim conciliar dados apresentados nos dois formatos de forma a trazer análises e fontes mais atuais e detalhadas, embora tenhamos encontrado limitações. Com a disposição dos dados do setor, procuramos conciliar as previsões existentes no setor de energias limpas a partir de informações proporcionadas pela IRENA e IEA, evidenciando a necessidade de recursos minerais não-energéticos para o setor e desafios existentes.

Resultados

Embora cada uma das dezessete terras-raras possua aplicações diferentes, quatro elementos – neodímio, disprósio, praseodímio e térbio – são de particular importância para o setor de energia limpa. Um dos principais usos são ímãs permanentes para motores empregados em turbinas eólicas. A demanda por neodímio mais do que duplica nos dois cenários desenhados pela IEA (2021), atingindo 70kt/ano e mais de 90kt em 2040, respectivamente. Tecnologias de energia limpa representam 15% da demanda total de neodímio hoje, e sua participação deve aumentar para 25% ou 40% nos cenários propostos.

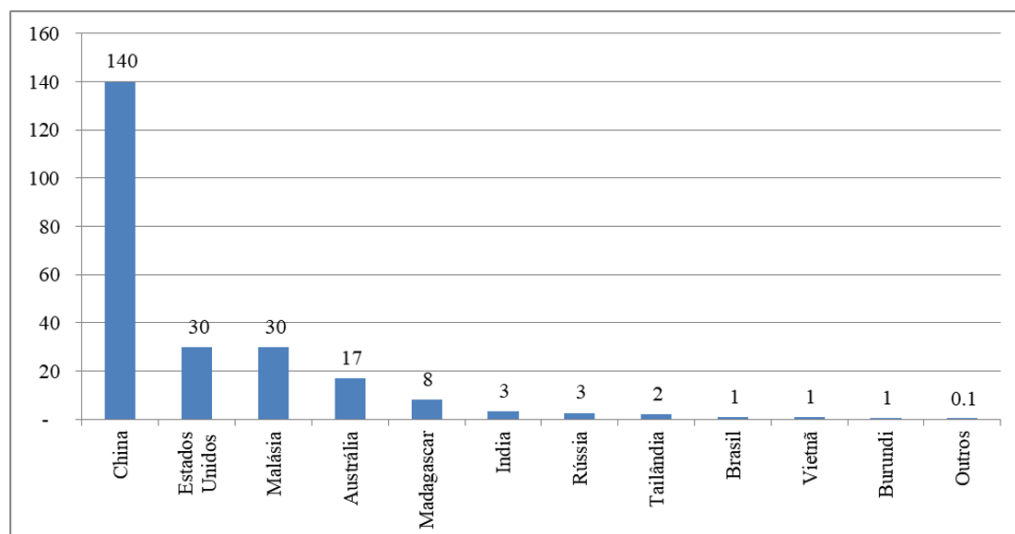
Segundo a USGS, reservas internacionais de terras-raras totalizam cerca de 120.000.000t. Os cinco países de maiores reservas em 2020 (Figura 1) foram apontados pela agência como sendo a China, com 44.000.000t (36,7% da totalidade internacional), o Vietnã, com 22.000.000t (18,3%), o Brasil, com 21.000.000t (17,5%), a Rússia, com 12.000.000 (10,0%) e a Índia, com 6.900.000t (5,8%) (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 2021). A disparidade entre as dotações de cada país fica evidenciada pela Figura 1: a China possui o dobro das reservas do Vietnã, o segundo país de maiores reservas.

Figura 1: reservas internacionais de terras-raras de acordo com a USGS (2021), em 2020 (em milhares de t)



Fonte: Elaboração própria com base em dados da USGS (2021).

Figura 2: produção internacional de terras-raras no ano de 2020 (em milhares de t)



Fonte: Elaboração própria com base em dados da USGS (2021).

O ano de maior concentração chinesa no setor de terras-raras foi 2010, em cuja produção foi de 130.000t, correspondendo a 97,7% do total (133.000t). Os outros países

que tiveram produção nesse ano foram a Índia, produzindo 2,800t (2,1% do total) e o Brasil, que produziu 550t (0,4%). Observa-se no decorrer da série temporal um pico de preços de todos os metais de terras-raras no ano de 2010 (Figura 4). Neste ano, a China iniciou uma restrição de exportações de óxidos de terras-raras através de cotas e tarifas de exportações que causaram uma alta significativa nos preços dos produtos. O movimento do governo teve como motivação uma regulamentação de seu mercado envolvendo diretrizes ambientais (USGS, 2010). Atribui-se, ainda, que as restrições se deram por um contencioso entre China e Japão acerca de uma disputa territorial (GASPAR FILHO, 2019).

Figura 3: produção internacional de terras-raras de 2001 a 2020 (em t)

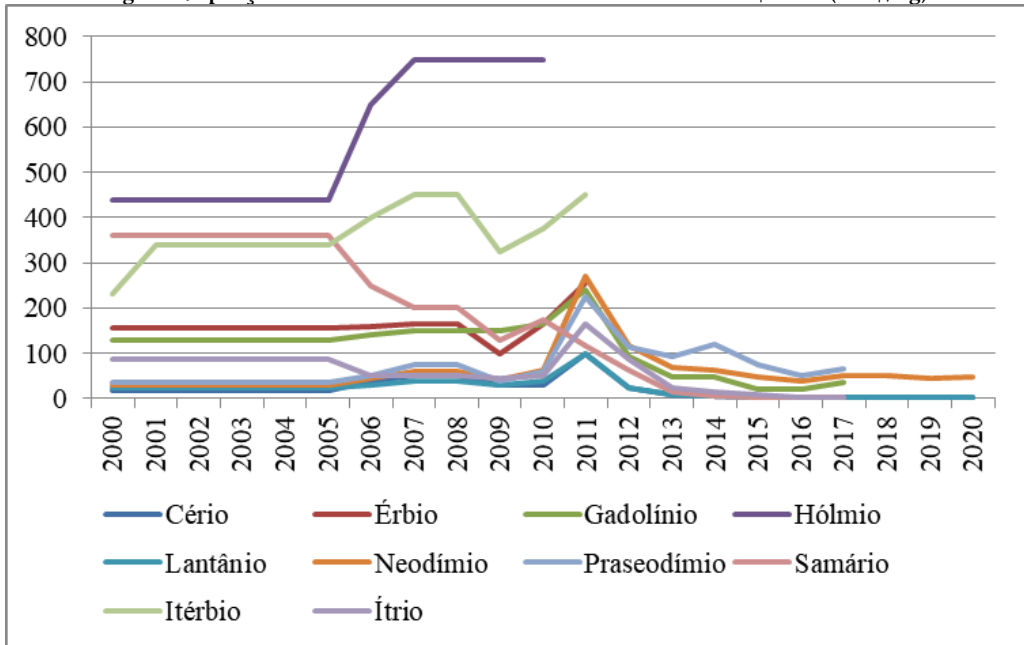
Ano / país	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
China	73.000	73.000	88.000	92.000	95.000	119.000	119.000	120.000	120.000	129.000	130.000
Estados Unidos	5.000	5.000	5.000	-	-	-	-	-	-	-	-
Mianmar											
Sri Lanka	120	120	120								
Austrália	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Madagascar											
Índia	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.700	2.800
Rússia											
Tailândia				2.200	2.200	-	-				
Brazil	200	200	200			750	730	650	650	550	550
Vietnã			-								
Burundi											
Malásia	450	450	450	250	250	750	200	380	380	350	30
Commonwealth			2.000	2.000	2.000						
Ex-URSS	2.000	2.000	2.000								
Malauí											
Outros	-	-	-	-	-	400					
Total mundial (aproximado)	83.500	83.500	98.300	99.100	102.000	123.000	123.000	124.000	124.000	133.000	133.000
Sem dados											
Fora da lista											

Ano/ país	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
China	105.000	100.000	95.000	105.000	105.000	105.000	105.000	120.000	132.000	140.000
Estados Unidos	-	800	5.500	5.400	5.900	-	-	18.000	28.000	39.000
Mianmar							-	19.000	25.000	31.000
Sri Lanka										
Austrália	2.200	3.200	2.000	8.000	12.000	15.000	19.000	21.000	20.000	21.000
Madagascar								2.000	4.000	2.800
Índia	2.800	2.900	2.900		1.700	1.500	1.800	2.900	2.900	2.900
Rússia		2.400	2.500	2.500	2.800	2.800	2.600	2.700	2.700	2.700
Tailândia			800	2.100	760	1.600	1.300	1.000	1.900	3.600
Brazil	250	140	330	-	880	2.200	1.700	1.100	710	600
Vietnã		220	220	200	250	220	200	920	1.300	700
Burundi							-	630	200	300
Malásia	280	100	180	240	500	300	180	200	-	
Commonwealth				-	-	-	-	-	-	
Ex-URSS								-	-	
Malawi					-	-	-			
Outros							-	60	66	100
Total mundial (aproximado)	111.000	110.000	110.000	123.000	130.000	129.000	132.000	190.000	220.000	240.000
	Sem dados									
	Fora da lista									

Fonte: Elaboração própria com base em dados da USGS (2001-2021).

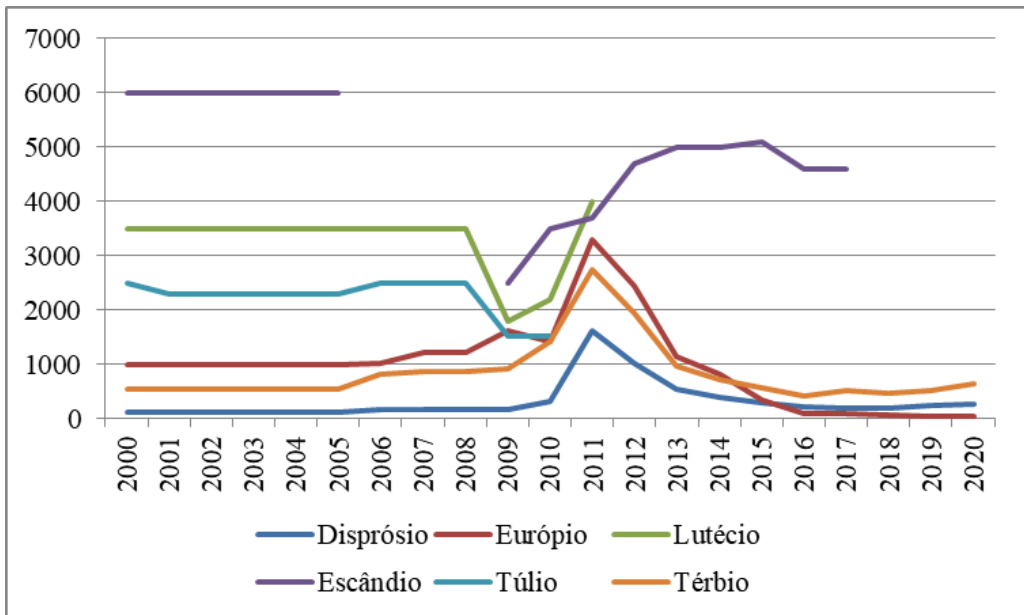
Os gráficos de nível de preços gerados para este trabalho foram separados em duas categorias: 1) terras-raras que se mantiveram abaixo do valor de US\$ 800/kg em toda a sua série histórica (Figura 4) e 2) terras-raras que atingiram esse valor em ao menos um momento do período abordado (Figura 5). A divisão foi realizada para que a visualização dos dados fosse mais nítida. Os dados coletados foram disponibilizados pela USGS de maneira assimétrica, de forma que nem todas as séries temporais puderam compreender os 20 anos de nosso recorte temporal.

Figura 4: preço de terras-raras com valores inferiores a US\$ 800 (US\$/kg)



Fonte: Elaboração própria com base em dados da USGS (2001-2021).

Figura 5: preço de terras-raras com valores superiores a US\$ 800 (US\$/kg)



Fonte: Elaboração própria com base em dados da USGS (2001-2021).

Discussão

Qual é a viabilidade de uma transição energética dependente de matrizes energéticas renováveis, mas que em sua cadeia de produção há ampla utilização de recursos minerais finitos? Os minerais críticos não-energéticos cumprem funções essenciais na maior parte dos equipamentos de alta tecnologia nas economias modernas (FIZAINE, 2014). Através dos dados dispostos no tópico anterior, é possível identificar alguns entraves à produção de terras-raras que poderão ser obstáculos à transição energética.

De acordo com dados da USGS, a produção internacional de terras-raras foi liderada pelo mercado chinês em todo o recorte temporal de nosso trabalho. No ano de 2020, os cinco maiores produtores de terras-raras foram a China, com 140.000 toneladas (representando 58% do total), os Estados Unidos, com 30.000 t (13%), Malásia, com 30.000 t (13%), Austrália, com 17.000 t (7%), e Madagascar, com 8.000 t (3%). Como fica evidente, a liderança da China no mercado de terras-raras é expressiva, pela sua produção mais de quatro vezes superior à dos Estados Unidos, na segunda posição. É possível observar na série histórica que a produção chinesa é a única a sustentar produção elevada em todo o período contemplado. Os Estados Unidos, por sua vez, apesar de se situarem no segundo lugar do ranking, não possuem uma produção regular no período observado.

Da mesma forma que se observam riscos associados à cadeia produtiva de derivados de petróleo, estes também estão presentes nas cadeias de valor de energias limpas (HENSEL, 2011). Tecnologias geradoras de energias limpas e mudanças de caráter sistêmico em eletrificação e digitalização do meio energético possuem perfis distintos em termos de requisitos de minerais críticos quando comparadas ao portfólio existente (BAZILIAN, 2018), observando-se a necessidade de se assegurar, por exemplo, a produção de chips para que atores atinjam metas tecnológicas da Quarta Revolução Industrial. Além disso, embora o petróleo seja uma commodity única com um grande mercado global, existem vários minerais essenciais ao setor de energia, com suas próprias complexidades e dinâmicas de abastecimento (IEA, 2021).

Fatores macroeconômicos podem limitar o crescimento da demanda por minerais críticos. Desemprego elevado e durante extenso período de tempo poderia reduzir a busca por carros elétricos. Austeridade fiscal em diferentes áreas do orçamento poderia impactar na quantidade de subsídios ao setor eólico e solar ou outras tecnologias emergentes dependentes de terras-raras (HENSEL, 2011).

No passado, tensões no equilíbrio entre oferta e demanda de diferentes minerais geraram investimentos adicionais e medidas para moderar ou substituir a demanda. Essas respostas provocaram defasagens e foram acompanhadas por considerável volatilidade de preços. Episódios semelhantes no futuro podem atrasar a transição e aumentar seu custo. Dada a urgência de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE), isso constitui um risco elevado. À medida que as transições ganham força, tecnologias de energia limpa estão se tornando o segmento de demanda de crescimento mais rápido por minerais críticos (IEA, 2021).

A IRENA (2019b) aponta como principal fator de transformação do setor o rápido declínio nos custos das energias renováveis. O custo médio ponderado global da eletri-

cidade de todas as fontes renováveis comercialmente disponíveis seguiu em tendência de queda em 2018. Para projetos eólicos *onshore* comissionados em 2018, o custo médio ponderado global da eletricidade atingiu um mínimo de US\$0,056 por quilowatt-hora (kWh), que foi 13% menor do que em 2017 e 35% menor do que em 2010 (US\$0,085/kWh).

A discussão de relatórios do setor elétrico voltados para projeções de cenários nos permite a abordagem do nexo segurança energética-minerais críticos não-energéticos enxergando as tendências existentes envolvendo todos os elementos presentes na elaboração desse nexo. Os relatórios trazidos nos fornecem insumos informacionais apropriados, ao abordarem a temática da segurança energética, da transição energética, dos minerais críticos e das tendências de mudança. A menção feita pela IRENA aos minerais utilizados nas cadeias de produção sugere o reconhecimento, pela agência, do nexo proposto, ainda que considere o advento das energias renováveis um fator que tende a elevar a segurança energética dos Estados.

Os custos da eletricidade eólica *onshore* já seriam competitivos e estariam reduzindo novos custos de geração de energias poluentes em muitos casos. Com o rápido declínio dos custos da energia solar PV nos últimos anos (o custo nivelado da eletricidade diminuiu 77% em 2018 comparado a 2010), a natureza complementar das duas tecnologias e a disponibilidade de recursos em diferentes estações do ano poderia resultar em um sistema de custos baixos (IRENA, 2019b).

Em um cenário que atende às metas do Acordo de Paris, a participação das tecnologias de energias limpas na demanda total aumenta significativamente nas próximas duas décadas para mais de 40% para cobre e elementos de terras raras, 60-70% para níquel e cobalto e quase 90% para lítio. Veículos elétricos e armazenamento em baterias já substituíram os bens se tornando a maior demanda de lítio e devem substituir o aço inoxidável como o maior usuário final de níquel até 2040 (IEA, 2021).

Apesar de relatórios do setor energético apontarem que os EUA desfrutam de posição vantajosa no desenvolvimento de novas tecnologias, e de também observarmos que suas reservas minerais são significativas, o controle do país sobre a cadeia produtiva não se mostra constante. A busca pela estabilidade de cadeias produtivas é observada em medidas de diferentes administrações. É possível notar em uma série histórica de 20 anos, dois hiatos em que a produção estadunidense foi extinta: entre 2003 e 2011 e de 2016 a 2017.

Apesar da redução da atividade econômica em decorrência da pandemia do novo coronavírus, não se observou redução da produção de terras-raras no ano de 2020. Ao contrário, em oito dos dez principais produtores de terras-raras de 2020, houve elevação em relação a 2019. Isso pode sugerir a priorização de um setor estratégico das economias. Da mesma forma, as transições para energia limpa ganharam impulso em 2020, apesar de grandes perturbações econômicas e sociais causadas pela pandemia (IEA, 2021).

A IRENA afirma que no episódio relatado sobre a restrição de exportações chinesas em 2010, as terras-raras foram percebidas como escassas em parte pela natureza cíclica de seu mercado. Quando há uma elevação da demanda, a oferta tem resposta lenta

porque novos projetos de mineração têm prazos de entrega longos. O lapso de tempo faz com que os preços disparem, podendo levar as empresas a investir em excesso. Assim, o investimento fluiu para novos projetos, levando os preços ao colapso em 2012. Como desdobramento, em 2014, os EUA, Japão e União Europeia requisitaram a instauração de uma disputa na OMC, contestando a restrição chinesa (IRENA, 2019a)

A força chinesa no mercado de terras-raras foi também demonstrada no contexto da Guerra Comercial promovida entre os Estados Unidos (EUA) e a China, quando o país asiático suscitou a possibilidade de restringir suas exportações de terras-raras para os EUA como forma de coerção (GASPAR FILHO, 2019; GASPAR FILHO; SANTOS, 2019). Assim, a dependência de minerais críticos para a economia, energia e defesa se apresenta como um potencial causador de insegurança para Estados importadores (GASPAR FILHO; SANTOS, 2019; DELGADO; MARQUES; GASPAR FILHO, 2020).

Apesar dos relatórios do setor energético apresentarem a possibilidade de custos tendendo à queda em todos os cenários propostos para energias renováveis, é possível enxergarmos o impacto no nível de preços do mercado de terras-raras em 2010 como um precedente grave para o setor. Esse acontecimento, com elevação superior a 200% em menos de um ano, no mesmo ano em que a produção chinesa de terras-raras compôs 98% da totalidade internacional (USGS, 2011), é um fato que não pode ser desconsiderado. Essa ponderação é também harmoniosa com Ang *et al.* (2015), que, ao tratarem do nível de preços no mercado de energia como critério definidor da segurança energética de um ator, colocam como fator componente a volatilidade e o grau de competitividade do mercado. A resposta de formuladores de políticas públicas e empresas determinará se minerais críticos serão um possibilitador da transição energética ou se tornarão um gargalo do processo (IEA, 2021).

A IRENA coloca como improvável o surgimento de carteis no mercado de energias renováveis visto que a obtenção de minerais pode ser feita de diferentes formas, até mesmo através da reciclagem de materiais já utilizados. Esses fatores, somados às regras existentes do comércio internacional seriam impeditivos para a cartelização do setor (IRENA, 2019a). Contudo, o que se observa não é uma tendência à formação de carteis, mas à concentração da produção internacional de terras-raras tendendo ao monopólio chinês. Isto provocaria uma concentração de poder em um ator em uma etapa inicial da cadeia produtiva de tecnologias geradoras de energias limpas, podendo fazer com que ele se torne um *price-maker* do setor.

A abordagem dos entraves impostos pelos minerais críticos à transição energética é condizente com a necessidade de inserção da análise do ciclo de vida dos produtos trazida por Wang *et al.* (2019). Isso se dá porque muitas vezes os trabalhos da área não ponderam o consumo de recursos finitos na construção de equipamentos ou mesmo os impactos socioambientais provocados por etapas de suas cadeias produtivas. Deve-se considerar também que o processo de mineração em si é intensivo em consumo energético e de difícil descarbonização (SOVACOOOL *et al.*, 2020).

Ao analisarmos a cadeia de produção de maneira holística, propiciamos o desenvolvimento de mecanismos para que se reduzam riscos existentes. Isso envolveria a mu-

dança de posicionamentos existentes entre Estados detentores de diferentes capacidades de desenvolvimento tecnológico, proprietários de patentes, produtores e consumidores (HENSEL, 2011).

Garantir que os minerais essenciais possibilitem transições de energia limpa requer uma visão ampla das cadeias de abastecimento, da mineração ao processamento. Ainda que haja disponibilidade física das matérias-primas minerais, um gargalo na capacidade de processamento e refino pode elevar os preços dos produtos refinados e afetar o investimento em energia limpa. Além disso, concentrações mais altas da produção implicam na interrupção poder ter impactos mais amplos em toda a cadeia de valor (IEA, 2021).

Ao contrário da disponibilidade dos recursos energéticos renováveis, a distribuição de minerais pela crosta terrestre não é homogênea, como tampouco é a capacidade de extração e refino entre os Estados (SCHOLTEN *et al.*, 2019). O mapeamento de demandas de minerais atrelado a políticas energéticas nacionais poderia levar a novas parcerias e ao aumento da conscientização sobre a questão, gerando ganhos em particular para políticas climáticas e estudos energéticos. A mitigação de efeitos das mudanças climáticas deveria ser acompanhada da questão da segurança dos minerais e estratégias industriais de forma a gerar benefícios mais amplos, como no campo ambiental, político e econômico (SOVACOOOL *et al.*, 2020).

A IRENA (2019a) afirma ainda que três categorias de países têm potencial para emergir como novos líderes em energia renovável: países com alto potencial técnico para geração de energia renovável; países ricos em minerais, que têm a oportunidade de se tornar parte da produção global e das cadeias de valor necessárias para tecnologias renováveis; e líderes em inovação tecnológica posicionados para obter o máximo da transformação energética global.

A agência afirma, entretanto, que as maiores reservas de metais e minerais necessários para tecnologias renováveis são encontradas em Estados fracos com registros de governança pobres. Esforços são empreendidos para abordar a questão dos denominados “minerais de conflito”, de forma a aumentar a transparência e a responsabilidade ao longo da cadeia de abastecimento global. A OCDE publicou diretrizes para empresas que exploram ou comercializam minerais e o Conselho de Segurança da ONU busca a responsabilização de atores em Estados afetados por conflitos (IRENA, 2019a). É necessário observar que as próprias relações interestatais e dinâmicas de conflitos tendem a mudar a partir da mudança da matriz energética dos países (SCHOLTEN *et al.*, 2019).

A rede de interdependências entre nações em termos de reservas e produção de minerais críticos para tecnologias geradoras de energias limpas distribui o risco entre países produtores e consumidores. A chave para desenvolver uma estratégia de mitigação de risco na cadeia produtiva deve envolver a compreensão das interrelações entre os papéis dos atores (produtores, consumidores e detentores dos direitos de propriedade intelectual das tecnologias aplicadas) e a necessidade de flexibilização contínua na reformulação de estratégias nacionais voltadas para recursos naturais (HENSEL, 2011).

Articulação internacional pode ser observada no setor: o Canadá, apesar de não apresentar nenhuma ocorrência na série histórica de produção de terras-raras, é o país

analisado de nona maior reserva de terras-raras do mundo. Hoje, ele, a Austrália, EUA, Peru e Botsuana são países integrantes da Energy Resources Governance Initiative (ERGI), iniciativa voltada para governança no setor de mineração planejado para insumos para o setor de energias limpas. A cooperação aparenta ser uma possibilidade de se elevar a segurança energética dos Estados, dada a variação da dotação de recursos minerais em seus solos, a infraestrutura produtiva geograficamente distribuída e o reconhecimento dos países integrantes como parceiros estratégicos. A IEA (2021) afirma que, dada a natureza complexa das cadeias de abastecimento de minerais que se estendem por todo o mundo e envolvem diversos minerais, nenhum país será capaz de conduzir individualmente as mudanças necessárias à transição energética.

Considerações finais

Assegurar um fornecimento estável de minerais críticos não-energéticos a um preço acessível é essencial para que se realize a atual transição energética, independentemente da forma de geração de energia empregada. Observamos atualmente a impossibilidade de dissociar a disponibilidade energética de materiais primários não-energéticos. A devida governança desses recursos dependerá da articulação de atores globais para que minerais críticos sejam um facilitador do processo e que a transição energética seja empreendida de maneira a não ser nociva ao ambiente em diferentes etapas dos processos necessários.

Considerando a cadeia produtiva concentrada desses recursos e a redução gradual do consumo de recursos fósseis impulsionada pelo comprometimento com regimes internacionais, a transição energética resulta ocasionadora de um fenômeno denominado transição da segurança energética. Isto porque o eixo de dependência externa é deslocado para os países capazes de prover insumos necessários à geração de energias limpas, assumindo progressivamente o lugar dos exportadores de combustíveis fósseis.

A presença da discussão sobre minerais críticos em relatórios de agências internacionais como a IEA e a IRENA é indicativo do reconhecimento do nexo proposto pelo trabalho, ainda que as agências considerem o advento das energias renováveis um fator que tende a elevar a segurança energética dos Estados. Há uma demanda premente em descarbonizar economias internacionais que somente será atendida com o devido provimento de minerais críticos. A má governança dos recursos pode conduzir a uma transição energética mais dispendiosa, lenta e poluente.

A pertinência do estudo dos minerais críticos à segurança energética é, de fato, muito recente, em que pese seu papel histórico também nas infraestruturas de geração de energias fósseis. Todavia, o contexto de transição energética para matrizes limpas exige que se reconsidere alguns conceitos basilares da segurança energética. A descarbonização e a independência energética almejadas por um ator podem somente ser alcançadas em uma conjuntura em que haja disponibilidade suficiente de recursos capazes de concretizar sua transição energética.

Considerando o fator político como uma das variáveis determinantes da criticalidade dos minerais e da segurança energética, é importante que se note que a vulnerabilidade

diante da dependência externa não é sempre a mesma, uma vez que há Estados tradicionalmente parceiros que não oferecem elevado patamar de risco. No caso estadunidense, por exemplo, observamos em sua lista de minerais críticos recursos importados do Canadá em sua totalidade, o que não oferece um risco tão elevado quanto importações da China, sua competidora estratégica.

Modelos de depósitos minerais continuarão a evoluir de forma a incrementar a compreensão de onde a exploração mineral deve ocorrer e de que forma ela pode ser mais eficiente. No curto prazo, o investimento em pesquisa e desenvolvimento deve ser uma prioridade de Estados que desejam realizar uma transição energética eficiente, da mesma forma que alianças com atores capazes de suprir suas carências de recursos naturais ou infraestrutura de refino. Atores que hoje redigem estratégias para reduzir a vulnerabilidade no mercado de minerais críticos, como EUA, Japão, Austrália, Canadá e União Europeia, buscam em parceiros tradicionais a possibilidade de cooperação.

Por fim, é fundamental que se observe que a transição para energias renováveis, em função da composição das infraestruturas aplicadas, é também essencialmente dependente de recursos finitos. Ainda que o consumo de combustíveis fósseis seja reduzido, o consumo de minerais críticos não-energéticos aplicados a cadeias de produção tende a se elevar, criando novas dependências e propiciando novos cenários de escassez.

A pesquisa encontrou dificuldades devido à ausência de dados completos referentes ao setor mineral. Brechas na elaboração das séries históricas resultaram da escassez de dados referentes a alguns anos. O foco nas terras-raras como parâmetro de pesquisa nos proporcionou a elaboração do trabalho, mas uma visão completa do setor mineral permitiria análises mais compreensivas. Trabalhos futuros que foquem especialmente na conservação de energia em baterias de diferentes materiais poderão contribuir para análises mais robustas. A elaboração de estudos sobre diferentes dependências de Estados avançados na transição energética como China, Estados Unidos, membros da União Europeia ou Japão oferecerão contribuição significativa para o campo. Da mesma forma, estudos devem ser elaborados para que se projete o papel de países em desenvolvimento na transição energética global, evitando cenários análogos à chamada “maldição dos recursos naturais”.

Referências

- ARENT, D.; ARNDT, C.; MILLER, M.; ZINAMAN, O. Introduction and Synthesis. In: ARENT, D *et al.* (ed.). **The Political Economy of Clean Energy Transitions**. 1. ed. Oxford: Oxford University Press, 2017. p. 292-312.
- ANG, B. W.; CHOONG, W. L.; NG, T. S. Energy security: Definitions, dimensions and indexes, **Renewable Sustainable Energy Review**, v. 42, 2015. pp. 1077–1093.
- BAZILIAN, M.; SOVACOOOL, B.; MOSS, T. Rethinking Energy Statecraft: United States Foreign Policy and the Changing Geopolitics of Energy. **Global Policy**, v. 8, n. 3, p. 422-425, 2017.
- BAZILIAN, M. The mineral foundation of the energy transition. **The Extractive Industries and Society**. v. 5, n. 1, p. 93 - 97, 2018.
- DELGADO, F.; MARQUES, J. V.; GASPAR, V. The Geopolitics of Renewable Energy: the Rare-Earth Elements Case. **Geopolitics of Energy**. v. 42, n. 2, p. 8-12, fev 2020.
- DUFFIELD, J S. Energy and Security. In: DENEMARK, R. (ed.). **The International Studies Encyclopedia**, 2010.
- FIZAINE, F. **Analyses de la disponibilité économique des métaux rares dans le cadre de la transition énergétique**. 2014. Tese (Doutorado em Ciências Econômicas) - Faculté de Sciences Economiques et de Gestion. Université de Bourgogne, Bourgogne, 2014.
- FOUQUET, R., PEARSON, G. Past and Prospective Energy Transitions: Insights from History. **Energy Policy**, v. 50, n. 1, p. 1-7, 2012.
- GASPAR FILHO, V. Chineses miram em vulnerabilidade estadunidense no mercado de terras-raras. **Boletim Geocorrente**, Rio de Janeiro, v. 95, p 5-5, jun. 2019.
- GASPAR FILHO, V.; SANTOS, T.; Mineral-Resource Security: niobium's criticality to the US Defense. In: **International Conference of Economics and Security**, 26-28 junio, 2019, Madrid.
- GRUBLER, A. *et al.* A low energy demand scenario for meeting the 1.5°C target and sustainable development goals without negative emission technologies. **Nature Energy**. v. 3, p. 515 - 527, 2016.
- HENSEL, N. Economic Challenges in the Clean Energy Supply Chain: The Market for Rare Earth Minerals and Other Critical Inputs. **Business Economics**. v. 46, p. 171-184, 2011.
- HESHMATI, A.; ABOLHOSSEINI, S. European Energy Security: Challenges and Green Opportunities. In: ARENT, D *et al.* (ed.). **The Political Economy of Clean Energy Transitions**. 1. ed. Oxford: Oxford University Press, 2017. p. 292- 312.
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **A New World: the geopolitics of the energy transformation**. 1. ed. Abu Dhabi: IRENA, 2019a.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Future of Wind: deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects** (A Global Energy Transformation paper). 1. ed. Abu Dhabi: IRENA, 2019b.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **The Role of Critical World Energy Outlook Special Report Minerals in Clean Energy Transitions**. 2021.

JENKIN, G. R. T.; LUSTY, P. A. J.; MCDONALD, I.; SMITH, M. P.; BOYCE, A. J.; WILKINSON, J. J. Ore deposits in an evolving Earth: an introduction. In: JENKIN, G. R. T.; JIN, Y.; KIM, J.; GUILLAUME, B. Review of critical material studies. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 113, p. 77-87, oct 2016.

JIN, Y.; KIM, J.; GUILLAUME, B. Review of critical material studies. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 113, p. 77-87, oct 2016.

LADISLAW, S.; CAREY, L.; BRIGHT, H. Critical Minerals and the Role of U.S. Mining in a Low-Carbon Future. **Center for Strategic & International Studies**, 2019.

LØVIK, A.; HAGELÜKEN, C.; WÄGERA, P. Improving supply security of critical metals: Current developments and research in the EU. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 15, p. 9-18, April 2018.

LUSTY, P.A.J.; GUNN, A.G. Challenges to global mineral resource security and options for future supply. In: JENKIN, G. R. T.; LUSTY, P. A. J.; MCDONALD, I.; SMITH, M. P.; BOYCE, A. J.; WILKINSON, J. J. (eds.). **Ore Deposits in an Evolving Earth**. Geological Society. London: Geological Society, Special Publications, p. 265-276, 2015.

MCLELLAN, B.; CORDEN, G.; SALEEM, A.; GOLEV, A. Rare metals, unconventional resources, and sustainability. Special Paper of the Geological Society of America. v. 520, p. 57 - 65, 2016.

ÖZDAMAR, Ö. Energy, Security, and Foreign Policy. In: DENEMARK, R. (ed.). **The International Studies Encyclopedia**, 2010.

ÖZDEMIROĞLU, E. **Measuring Natural Resource scarcity: A study of the Price Indicator CSERGE**, University of East Anglia, Norwich, England, GEC 93-14, ISSN 0967-8875, 1993.

PARKER, C. Energy Transition in South America: Elite's Views In The Mining Sector, Four Cases Under Study. **Ambiente & Sociedade**. São Paulo. Vol. 21, 2018.

RAPHAEL, S.; STOKES, D. Energy Security. In: COLLINS, A. (org.). **Contemporary Security Studies**. Oxford: Oxford University Press, p. 378-393, 2010.

SABBATELLA, I.; SANTOS, T. The IPE of regional energy integration in South America. In: VIVARES, Ernesto (Ed.). **The Routledge Handbook to Global Political Economy: Conversations and Inquiries**. Cap. 42. Routledge, 2020.

SANTOS, T. **Regional Energy Security: Re-evaluating concepts and policies to promote energy**

integration in Mercosur. Tese de Doutorado, PPE/COPPE/UFRJ, 2018.

SCHOLTEN, D; BAZILIAN, M; OVERLAND, I; WESTPHAL, K. The geopolitics of renewables: New board, new game. **Energy Policy**, v. 138, p. 1 - 6, 2019.

SINGHA, H.; BOCCA, R.; GOMEZ, P.; DAHLKE, S.; BAZILIAN, M. The energy transitions index: An analytic framework for understanding the evolving global energy. **Energy Strategy Reviews**, v. 26, n. 1, p. 1-10, 2019.

SOVACOOOL, B. K. An international assessment of energy security performance. **Ecological Economics**, v. 88, p. 148–158, 2013.

SOVACOOOL, B. K. The history and politics of energy transitions: comparing contested views and finding common ground. Working paper, **World Institute for Development Economics Research**, 2016/81, 2016.

SOVACOOOL, B. K., MUKHERJEE, I. Conceptualizing and measuring energy security, a synthesized approach. **Energy**, v. 36, n. 8, p. 5343–5355, 2011.

SOVACOOOL, B.; SALEEM H., A; BAZILIAN, M.; RADLEY, B.; NEMERY, B.; OKATZ, J.; MULVANEY, D. Sustainable minerals and metals for a low-carbon future. **Science Magazine**, v. 367, n. 6473, p. 30-33, 2020.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (EUA). Departamento do Interior. **Mineral Commodity Summaries 2003**. 1. ed. Reston: U.S. Geological Survey, 2003.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (EUA). Departamento do Interior. **Mineral Commodity Summaries 2004**. 1. ed. Reston: U.S. Geological Survey, 2004.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (EUA). Departamento do Interior. **Mineral Commodity Summaries 2005**. 1. ed. Reston: U.S. Geological Survey, 2005.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (EUA). Departamento do Interior. **Mineral Commodity Summaries 2006**. 1. ed. Reston: U.S. Geological Survey, 2006.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (EUA). Departamento do Interior. **Mineral Commodity Summaries 2007**. 1. ed. Reston: U.S. Geological Survey, 2007.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (EUA). Departamento do Interior. **Mineral Commodity Summaries 2008**. 1. ed. Reston: U.S. Geological Survey, 2008.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (EUA). Departamento do Interior. **Mineral Commodity Summaries 2009**. 1. ed. Reston: U.S. Geological Survey, 2009.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (EUA). Departamento do Interior. **Mineral Commodity Summaries 2010**. 1. ed. Reston: U.S. Geological Survey, 2010.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (EUA). Departamento do Interior. **Mineral Com-**

modity Summaries 2011. 1. ed. Reston: U.S. Geological Survey, 2011.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (EUA). Departamento do Interior. **Mineral Commodity Summaries 2012**. 1. ed. Reston: U.S. Geological Survey, 2012.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (EUA). Departamento do Interior. **Mineral Commodity Summaries 2013**. 1. ed. Reston: U.S. Geological Survey, 2013.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (EUA). Departamento do Interior. **Mineral Commodity Summaries 2014**. 1. ed. Reston: U.S. Geological Survey, 2014.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (EUA). Departamento do Interior. **Mineral Commodity Summaries 2015**. 1. ed. Reston: U.S. Geological Survey, 2015.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (EUA). Departamento do Interior. **Mineral Commodity Summaries 2016**. 1. ed. Reston: U.S. Geological Survey, 2016.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (EUA). Departamento do Interior. **Mineral Commodity Summaries 2017**. 1. ed. Reston: U.S. Geological Survey, 2017.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (EUA). Departamento do Interior. **Mineral Commodity Summaries 2018**. 1. ed. Reston: U.S. Geological Survey, 2018.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (EUA). Departamento do Interior. **Mineral Commodity Summaries 2019**. 1. ed. Reston: U.S. Geological Survey, 2019.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (EUA). Departamento do Interior. **Mineral Commodity Summaries 2020**. 1. ed. Reston: U.S. Geological Survey, 2020.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (EUA). Departamento do Interior. **Mineral Commodity Summaries 2021**. 1. ed. Reston: U.S. Geological Survey, 2021.

WANG, P; CHEN, L.; GE, J.P.; CAI, W.; CHENA, W.Q. Incorporating critical material cycles into metal-energy nexus of China's 2050 renewable transition. **Applied Energy**, v. 253, 2019.

Victor Gaspar Filho

✉ victorgasparfilho@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2491-3811>

Submetido em: 16/10/2021

Aceito em: 28/06/2022

2022;25e:01791

Thauan Santos

✉ thauan@marinha.mil.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4001-4322>

Transición de la Seguridad Energética: energías limpias, minerales críticos y nuevas dependencias

Victor Gaspar Filho
Thauan Santos

Resumen: Se observan dinámicas diferentes entre los mercados de energías renovables y fósiles, lo que sugiere la necesidad de adoptar enfoques diferentes en el ámbito teórico y práctico de la seguridad energética. Sin embargo, en el contexto de la actual transición energética, existe una concentración geográfica de las cadenas de producción de nuevos equipamientos de generación de energía limpia, lo que crea nuevas dependencias de insumos y socios comerciales. En consecuencia, la seguridad energética se ve afectada por la relación con los insumos no energéticos, como los minerales críticos. En este trabajo se realiza una investigación documental para un posterior análisis cuantitativo de los datos obtenidos. Tras la presentación de la discusión teórica sobre la seguridad energética, la transición energética y los minerales críticos, se analizan documentos de los sectores de la energía y los minerales redactados en el período comprendido entre 2000 y 2020. Se plantea que la transición hacia matrices energéticas menos contaminantes puede dar lugar a la creación de nuevas dependencias y que el acceso a recursos no energéticos es una condición para el éxito de la transición energética.

São Paulo. Vol. 25, 2022

Artículo original

Palabras-clave: Seguridad energética; transición energética; energía; minerales críticos; recursos naturales.

Energy Security Transition: clean energy, critical minerals and new dependencies

Victor Gaspar Filho
Thauan Santos

Abstract: Different dynamics can be observed between the renewable and fossil energy markets, suggesting the need for different approaches in the theoretical and practical field of energy security. However, in the context of the current energy transition, there is a geographic concentration of production chains of new clean energy generating equipment, which creates new dependencies for inputs and commercial partners. Consequently, energy security is affected by the relationship with non-energy inputs such as critical minerals. In this work, we seek to engage in documentary research followed by a quantitative analysis of data provided by the United States Geological Survey. After the presentation of the theoretical discussion about energy security, energy transition and critical minerals, we analyse documents from the energy and mineral sectors written in the period from 2000 to 2020. It is posited that the transition towards less polluting energy matrices can result in the creation of new dependencies and that access to non-energy resources is a condition for the success of the energy transition.

São Paulo. Vol. 25, 2022

Original Article

Keywords: Energy security; energy transition; energy; critical minerals; natural resources.