

MINERAIS CRÍTICOS DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA OU DO CARRO ELETRIFICADO? A IMPORTÂNCIA DO SETOR AUTOMOTIVO NA DEMANDA FUTURA POR MINERAIS CRÍTICOS¹

Rafael Leão²

SINOPSE

A contribuição dos carros eletrificados para a transição energética aumentará nas próximas décadas e constituirá o principal vetor de demanda por minerais críticos. Enquanto tecnologias como energia solar e eólica apresentam crescimento estabilizado em sua demanda mineral, os veículos elétricos responderão por até 45% do consumo total desses recursos até 2050 – e por mais de 80% do crescimento da demanda de substâncias como lítio, cobalto e níquel. Essa tendência amplifica desafios geopolíticos, socioambientais e expõe gargalos de oferta, exigindo avanços em reciclagem e economia circular, sobretudo em baterias automotivas e do sistema elétrico.

Palavras-chave: transição energética; mudança climática; minerais críticos e estratégicos; carro elétrico; economia circular.

1 INTRODUÇÃO

A transição energética está reconfigurando dois sistemas estruturantes para o funcionamento da economia mundial: energia e transportes. Os sistemas de geração de energia elétrica baseados em combustíveis fósseis estão sendo substituídos por sistemas baseados em energias renováveis, notadamente eólica e solar, e, subsidiariamente, baterias estacionárias para o sistema elétrico. Nos transportes, a participação de veículos eletrificados na frota de diversos países do mundo tem aumentado a cada ano (IEA, 2025a). Equipamentos de geração de energia eólica, solar, além de baterias e carros eletrificados, são intensivos em substâncias minerais conhecidas como *minerais críticos da transição energética* (IEA, 2021; Ibram, 2024; Leão *et al.*, 2024).

Ano após ano, aumenta a importância da demanda originária da transição energética para o setor minerador. As projeções de mercado em diversos cenários³ para as próximas décadas sugerem que essa tendência se intensificará em tal magnitude que a oferta primária⁴ de diversos minérios será insuficiente já em meados dos anos 2030 (Watari *et al.*, 2019; Collins *et al.*, 2024; IEA, 2025b). A expansão das atividades de reúso e reciclagem será primordial, portanto, ou então os gargalos da oferta primária se traduzirão em inflação e disputas geopolíticas, comprometendo o avanço da transição energética (Månberger e Johansson, 2019; Irena, 2023, 2024; Shiquan e Deyi, 2023; Radebe e Chipangamate, 2024; Pham e Hsu, 2025; Xing *et al.*, 2025; Kuzemko *et al.*, 2025; IEA, 2024b; IEA e OECD, 2025).

1. DOI: <https://dx.doi.org/10.38116/radar80art10>.

2. Especialista em políticas públicas e gestão governamental na Diretoria de Estudos e Políticas Setoriais, de Inovação, Regulação e Infraestrutura do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Diset/Ipea). E-mail: rafael.leao@ipea.gov.br.

3. Ver IEA (2024a) para discussão metodológica sobre cenários e projeções da Agência Internacional de Energia (IEA).

4. A oferta primária de minérios é aquela oriunda da própria extração mineral; e a oferta secundária provém do reúso e da reciclagem de substâncias minerais embutidas em matérias-primas industriais, máquinas, equipamentos e bens de consumo.

2 DEMANDA DE MINÉRIOS POR TECNOLOGIA: O DESTAQUE DO CARRO ELETRIFICADO

Uma análise detalhada da demanda mineral corrente e das projeções futuras sugere que a expansão do mercado de carros eletrificados será a principal responsável pela pressão sobre a capacidade de oferta do setor minerador. A tabela 1, retirada de Leão, Oliveira e Cunha (2025), demonstra isso com números.

TABELA 1

Demanda global de minerais críticos por tipo de tecnologia da transição energética

Minerais e tecnologias	Efetivo	Projeção de demanda					Expansão 2024-2050	Participação na expansão	Crescimento médio a.a.
	2024	2030	2035	2040	2045	2050			
	1 mil t			1 mil t					
Cobre	7.737,02	10.909,95	11.539,62	12.162,36	12.461,74	13.041,84	5.304,81		2,0
Rede elétrica	4.928,99	5.824,52	5.686,40	5.744,77	5.755,84	5.641,23	712,24	13,4	0,5
Carros elétricos	496,69	1.597,10	2.465,46	2.995,49	3.243,48	3.504,98	3.008,29	56,7	7,8
Painéis solares	1.657,20	2.373,69	2.242,63	2.230,22	2.177,88	2.377,17	719,97	13,6	1,4
Eólica	534,24	809,78	769,77	622,77	663,88	816,86	282,63	5,3	1,6
Baterias (sistema elétrico)	76,26	215,27	294,86	448,96	506,56	632,44	556,18	10,5	8,5
Outras tecnologias	43,65	89,58	80,48	120,14	114,09	69,14	25,49	0,5	1,8
Hidrogênio	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,0	5,6
Grafite	1.002,51	2.962,66	3.942,87	3.963,32	3.260,03	2.901,16	1.898,65		4,2
Carros elétricos	838,95	2.590,96	3.478,11	3.325,78	2.592,57	2.115,07	1.276,12	67,2	3,6
Baterias (sistema elétrico)	163,56	371,70	464,76	637,54	667,46	786,09	622,53	32,8	6,2
Níquel	561,72	1.349,25	1.953,11	2.381,06	2.591,25	2.790,18	2.228,46		6,4
Carros elétricos	321,14	959,08	1.558,79	1.843,30	2.057,08	2.145,51	1.824,37	81,9	7,6
Outras tecnologias	174,14	248,69	218,03	292,59	226,54	190,95	16,81	0,8	0,4
Baterias (sistema elétrico)	16,97	68,04	110,79	188,62	245,93	376,83	359,87	16,1	12,7
Eólica	47,45	67,84	59,48	51,63	56,96	70,64	23,19	1,0	1,5
Hidrogênio	1,40	4,71	5,19	4,09	3,93	5,37	3,97	0,2	5,3
Painéis solares	0,62	0,88	0,83	0,83	0,81	0,88	0,26	0,0	1,3
Silício	1.499,85	1.761,75	1.771,72	1.843,27	1.926,03	2.134,02	634,17		1,4
Painéis solares	1.480,78	1.652,11	1.488,45	1.426,41	1.325,53	1.368,34	-112,44	-17,7	-0,3
Carros elétricos	18,55	105,68	276,71	404,74	584,22	745,19	726,63	114,6	15,3
Baterias (sistema elétrico)	0,52	3,96	6,56	12,12	16,29	20,50	19,98	3,2	15,2
Outras tecnologias	0,01	0,01	0,01	-	0,00	-	-0,01	0,0	-
Manganês	186,04	601,77	1.226,67	2.127,43	2.789,85	3.448,24	3.262,20		11,9
Carros elétricos	60,34	356,47	928,42	1.715,61	2.287,12	2.734,36	2.674,02	82,0	15,8
Baterias (sistema elétrico)	4,25	68,85	133,05	260,06	339,07	519,55	515,30	15,8	20,3
Eólica	104,80	152,12	136,47	116,98	129,41	161,92	57,12	1,8	1,7
Outras tecnologias	16,64	24,32	28,73	34,78	34,26	32,40	15,76	0,5	2,6
Zinco	764,01	1.106,31	990,51	855,88	947,41	1.177,26	413,25		1,7
Eólica	734,75	1.065,92	955,13	818,70	905,74	1.133,21	398,46	96,4	1,7
Painéis solares	15,03	21,27	20,24	20,25	19,74	21,70	6,67	1,6	1,4
Outras tecnologias	14,23	19,12	15,14	16,93	21,93	22,35	8,12	2,0	1,8

(Continua)

(Continuação)

Minerais e tecnologias	Efetivo	Projeção de demanda					Expansão 2024-2050	Participação na expansão	Crescimento médio a.a.
	2024	2030	2035	2040	2045	2050			
	1 mil t			1 mil t					
							1 mil t	%	
Lítio	128,00	368,72	588,98	808,71	936,18	1.019,29	891,28		8,3
<i>Carros elétricos</i>	<i>109,03</i>	<i>326,09</i>	<i>537,60</i>	<i>738,67</i>	<i>860,04</i>	<i>930,29</i>	<i>821,27</i>	<i>92,1</i>	<i>8,6</i>
Baterias (sistema elétrico)	18,98	42,63	51,38	70,04	76,14	88,99	70,02	7,9	6,1
Cromo	241,32	349,70	299,16	333,51	318,17	311,01	69,70		1,0
Outras tecnologias	175,22	253,36	211,94	258,76	235,52	207,51	32,29	46,3	0,7
Eólica	66,10	96,34	87,22	74,76	82,65	103,51	37,41	53,7	1,7
Cobalto	70,59	148,24	146,44	135,83	160,13	172,36	101,78		3,5
<i>Carros elétricos</i>	<i>66,51</i>	<i>143,15</i>	<i>142,72</i>	<i>135,81</i>	<i>160,11</i>	<i>172,34</i>	<i>105,83</i>	<i>104,0</i>	<i>3,7</i>
Baterias (sistema elétrico)	4,06	5,06	3,70	-	-	-	-4,06	-4,0	-
Outras tecnologias	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,0	1,1
Hidrogênio	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	1,0
Terras raras	18,87	37,87	46,16	46,59	50,40	56,62	37,76		4,3
<i>Carros elétricos</i>	<i>8,36</i>	<i>21,66</i>	<i>29,99</i>	<i>33,87</i>	<i>36,72</i>	<i>39,46</i>	<i>31,10</i>	<i>82,4</i>	<i>6,2</i>
Eólica	10,50	16,18	16,15	12,71	13,67	17,15	6,65	17,6	1,9
Outras tecnologias	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	-0,00	0,0	-0,3
Hidrogênio	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-0,00	0,0	-
Molibdênio	33,83	47,50	40,27	43,45	43,44	45,44	11,61		1,1
Outras tecnologias	19,64	26,80	21,52	27,29	25,70	23,36	3,72	32,0	0,7
Eólica	13,83	20,14	18,21	15,61	17,26	21,61	7,78	67,0	1,7
Painéis solares	0,37	0,56	0,54	0,55	0,48	0,48	0,11	1,0	1,0
Platinoides	0,00	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02		10,3
Hidrogênio	0,00	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	100,0	10,3
Demais	39,19	80,92	230,24	449,74	502,05	615,81	576,62		11,2
Baterias (sistema elétrico)	-	26,89	181,16	381,70	432,75	544,70	544,70	94,5	16,2
Outras tecnologias	21,73	31,32	26,15	30,37	34,34	34,45	12,73	2,2	1,8
Painéis solares	17,04	21,69	21,83	36,80	34,07	35,47	18,42	3,2	2,9
Hidrogênio	0,19	0,64	0,71	0,56	0,54	0,73	0,54	0,1	5,2
Eólica	0,23	0,37	0,39	0,31	0,35	0,46	0,23	0,0	2,8
Total geral	12.282,96	19.724,65	22.775,76	25.151,17	25.986,71	27.713,26	15.430,30		3,2

Fonte: Leão, Oliveira e Cunha (2025).

Elaboração do autor.

Obs.: 1. a.a. — ao ano.

2. (-) não há participação na variação.

Nessa tabela é possível observar a produção mineral efetiva em 2024 e seus múltiplos usos — no contexto da transição energética. De acordo com as projeções da IEA, para o conjunto das tecnologias da transição energética, o carro eletrificado representará, isoladamente, o maior vetor de crescimento da demanda mineral nas próximas décadas. Em 2024, 15,6% das mais de 12 milhões de toneladas de minérios alocadas na transição energética foram direcionadas para carros eletrificados; já em 2030 essa proporção dobrará, alcançando quase 31%; dali até 2050, ficará entre 40% e 45%. Em 2050, o consumo de minerais pela transição energética estaria, pelas projeções, próximo de 28 milhões de toneladas. A variação de 2024 a 2050 seria de ~15,5 milhões de toneladas, e o carro eletrificado seria responsável por 67,8% dessa expansão, seguido pelas baterias estacionárias (17,4%). A expansão da rede elétrica, a energia eólica e a energia solar representariam mais ou menos de 4% a 5% (14%, se somadas).

No detalhe, para cada substância, os números são ainda mais impressionantes. As três últimas colunas da tabela 1 evidenciam: a expansão do consumo anual por substância e por tecnologia (expansão 2024-2050); a participação de cada tecnologia na expansão desse consumo em cada substância (participação na expansão); e a taxa de crescimento médio anual até 2050 (crescimento médio a.a.). Zinco, cromo, molibdênio, elementos platinoides e a categoria “demais” não têm participação na manufatura de carros eletrificados – até o momento, no paradigma tecnológico vigente. No restante das substâncias, o carro eletrificado representará: a totalidade do crescimento da demanda por cobalto e silício (104% e 114,6%); e quase a totalidade do crescimento da demanda por lítio, manganês, níquel e terras raras (92,1%, 82%, 81,9% e 82,4%). Em patamares inferiores, mas ainda assim expressivos, a manufatura de carros eletrificados responderá por 67,2% do crescimento da demanda por grafite e 56,7% da de cobre.

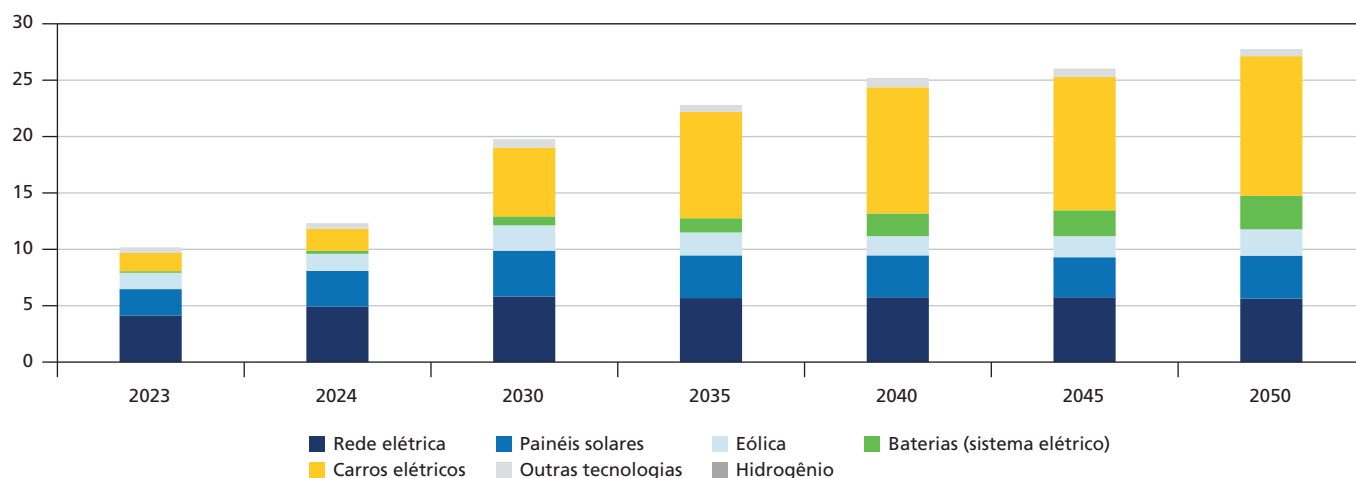
A participação da variação de demanda é uma informação importante, mas é preciso entender a velocidade do crescimento da demanda. A última coluna da tabela 1 evidencia a clivagem entre os carros elétricos e as baterias estacionárias, de um lado, com taxas altas, por vezes de dois dígitos, e painéis solares e sistemas eólicos, de outro, com taxas sempre pequenas, quase sempre abaixo de 2%. As altas taxas de crescimento da demanda projetadas para os próximos 25 anos são bastante superiores às taxas de crescimento da produção mineral efetiva no passado recente (Leão, Oliveira e Cunha, 2025); assim, são explicadas fundamentalmente pela expansão projetada para os carros eletrificados e, em menor escala, pelas baterias estacionárias.

Essas projeções indicam, portanto, que a expansão da frota mundial de carros eletrificados – ou seja, o eixo dos transportes – será a principal responsável pela pressão de demanda sobre o sistema minerador no futuro próximo, ainda que a reconfiguração do sistema de geração de eletricidade mantenha um patamar elevado de demanda por substâncias minerais. O gráfico 1 mostra como a demanda mineral decorrente da expansão do sistema elétrico baseado em energias renováveis já está entrando em tendência estacionária, com volume mineral demandado anualmente em estabilização. Rede elétrica, painéis solares, turbinas eólicas e baterias estacionárias, somadas, demandaram 8 milhões de toneladas de minérios em 2023 e 9,8 milhões de toneladas em 2024, representando 80% da demanda total por minerais críticos nos dois anos; em 2050, esses quatro vetores representarão 53% da demanda por minerais críticos. As projeções de 2024 até 2050 apontam crescimento anual médio da demanda mineral da rede elétrica, dos painéis solares e dos equipamentos eólicos em 1,1%, 1,2% e 1,5%, respectivamente. A demanda originária por baterias estacionárias crescerá em ritmo espetacular de 10,4% a.a., alcançando 10% da demanda total desses minérios em 2050, contra apenas 2,3% em 2024.

GRÁFICO 1

Demanda global consolidada de minerais críticos da transição energética por tecnologia

(Em 1 milhão t)



Fonte: IEA (2025b) e Critical Minerals Outlook 2024/IEA. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024>. Acesso em: 14 set. 2025. Elaboração do autor.

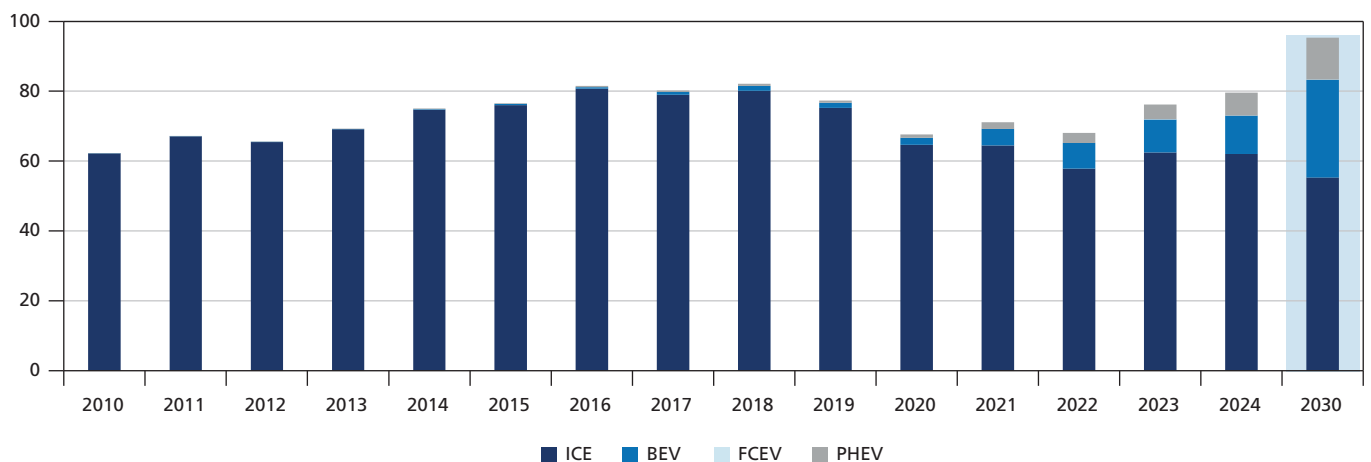
Obs.: Demanda projetada a partir de 2030 no Cenário de Políticas Declaradas (Stated Policies Scenario – Steps).

O que esses dados evidenciam, portanto, é que a própria transição energética está em transição, digamos assim, no que concerne a sua pressão sobre o sistema minerador global. Até o presente, a reconversão do sistema global de geração de energia lidera o combate às mudanças climáticas. As mudanças na geração de eletricidade são profundas. Dados mensais de produção de eletricidade da IEA⁵ mostram que a produção mundial de eletricidade aumentou 2,3 vezes entre 2010 e 2024, enquanto a de fontes renováveis aumentou 4,3 vezes e a de renováveis sem hidroeletricidade cresceu 9 vezes, representando 20% da eletricidade mundial em 2024 contra 5% em 2010.

É verdade, também, que a participação dos veículos eletrificados na frota global cresceu nesse mesmo período, saindo de 0,002% da frota em 2010 para 4,5% em 2024, de acordo com dados da IEA.⁶ Os efeitos sobre emissões de gases de efeito estufa (GEEs), entretanto, foram bem mais pronunciados no setor elétrico do que no setor de transportes. Dados de emissões globais de 1990 a 2021 mostram que eletricidade e transporte, juntos, representaram entre 40% e 50% das emissões globais, com tendência de alta no período. Até 2012, a taxa anual média de crescimento das emissões dos dois sistemas foi similar: 2,0% no setor de transportes e 2,6% no setor elétrico. De 2012 até 2019, contudo, o crescimento anual médio das emissões dos transportes permaneceu idêntica (2,0% a.a.), enquanto o crescimento anual médio das emissões do setor elétrico caiu consideravelmente (para 0,6%).⁷

GRÁFICO 2

Vendas e projeções de vendas de carros eletrificados (BEV, PHEV, FCEV) e convencionais (ICE) no mundo
(Em 1 milhão)



Fonte: IEA (2025a).

Elaboração do autor.

Obs.: 1. Dados históricos até 2024; projeção para 2030.

2. BEV – veículos elétricos a bateria (*battery electric vehicle*); PHEV – veículos elétricos híbridos *plug-in* (*plug-in hybrid electric vehicle*); FCEV – veículos elétricos a célula de combustível (*fuel cell electric vehicle*); e ICE – motor a combustão interna (*internal combustion engine*).

A pandemia da covid-19, contudo, alterou sensivelmente o funcionamento do mercado de carros eletrificados. De 2016 a 2019, a venda de carros (todos os tipos) ficou estacionada próxima a 80 milhões anuais. De 2020 em diante, as vendas de veículos ICE despencaram para o patamar de 60 milhões anuais, e a recuperação das vendas ao patamar anterior à pandemia foi liderada pelos veículos eletrificados. As projeções para 2030 indicam nova queda nas vendas de veículos ICE e crescimento ainda maior nas de veículos eletrificados, como pode ser visto no gráfico 2.

5. Monthly Electricity Statistics/IEA (Licence: Terms of Use for Non-CC Material). Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/monthly-electricity-statistics>. Acesso em: 14 set. 2025.

6. Global EV Outlook 2025/IEA (Licence: CC BY 4.0). Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/global-ev-outlook-2025>. Acesso em: 14 set. 2025.

7. Números calculados a partir de dados usado em Ritchie, Rosado e Roser (2020) e Our World in Data (Climate Watch 2024). Disponível em: <https://ourworldindata.org/grapher/ghg-emissions-by-sector>. Acesso em: 13 set. 2025.

3 REFLEXÕES FINAIS

Esses dados todos observados em conjunto evidenciam a expectativa de que a eletrificação do sistema de transportes seja a principal responsável pelo aumento da pressão sobre o setor minerador no futuro próximo. Além disso, é possível que o aumento das vendas de carros eletrificados aumente a contribuição marginal do setor de transportes para contenção das emissões de GEEs, ainda que a reconfiguração do sistema elétrico permaneça como eixo central dessa agenda.

Essas expectativas, se concretizadas, terão dois tipos de desdobramentos, sendo o primeiro deles de ordem socioambiental. Há, na literatura dos minerais críticos da transição energética, o debate sobre *decarbonization divide*, que sugere que os benefícios e os ônus da transição energética serão distribuídos desigualmente no planeta. Países desenvolvidos e em desenvolvimento ganhariam com a mitigação das mudanças climáticas, mas os benefícios econômicos e tecnológicos ficariam concentrados no mundo desenvolvido, enquanto os danos socioambientais, essencialmente por conta da extração e do refino mineral, ficariam concentrados em países em desenvolvimento (Sovacool *et al.*, 2020; Aramendia *et al.*, 2023; Carr-Wilson, Pattanayak e Weinthal, 2024). Já há estudos que evidenciam que mais de dois terços da “pegada mineral” da transição energética europeia está fora do próprio continente (Berthet *et al.*, 2024).

Se a contribuição marginal dos carros eletrificados para a transição energética de fato aumentar, essa tendência do *decarbonization divide* se agravará, pois os números apontam que 32% das vendas projetadas de 40 milhões de carros em 2030 ocorrerá nos Estados Unidos e na Europa, contra 27% das vendas ocorridas em 2024. Os dados de investimento global em energia⁸ evidenciam que a participação da Europa e da América do Norte nos investimentos em energia eólica e solar caíram de 45% em 2015 para 32% em 2024. Os países em desenvolvimento (exceto China), saíram de 11% para 14% dos investimentos em geração de energia eólica e solar, no mesmo período, mas chegaram a alcançar 18% em 2018. A China lidera e liderará a expansão do mercado de carros eletrificados, respondendo por 52% das vendas em 2030, e liderou a expansão da energia eólica e solar mundialmente até o momento. Em 2023, a China ultrapassou a soma de todos os países desenvolvidos nessas duas tecnologias, investindo US\$ 312 bilhões (contra US\$ 242 bilhões do mundo desenvolvido).

Ou seja, os países em desenvolvimento (exceto a China) têm mais condições de comungar dos benefícios da transição energética por meio da reconversão da matriz elétrica do que por meio do aumento de carros eletrificados em suas frotas. Esses efeitos podem ser marginais, contudo. A China, como grande produtor e processador mineral, estaria numa espécie de meio termo entre auferir benefícios (econômicos) e sofrer consequências (exaustão ambiental) da transição energética (Leão, Oliveira e Cunha, 2025).

O segundo desdobramento é de ordem tecnológica. Se, de fato, a demanda mineral evoluir conforme as projeções indicam, já em meados da década de 2030 a oferta mineral primária para diversas substâncias será insuficiente para atender ao mercado (Leão, Oliveira e Cunha, 2025). Em maior ou menor dimensão, reúso e reciclagem precisarão compensar esse gargalo no setor mineral. Como a tabela 1 e o gráfico 1 deixaram evidentes, carros elétricos (em volume e em velocidade de expansão) e baterias estacionárias (em velocidade de expansão) serão os grandes responsáveis pela aceleração da exaustão da capacidade de oferta primária.

Nessas circunstâncias, a discussão de economia circular nos minerais críticos da transição energética estará primordialmente calcada no reúso de baterias (primordialmente, na composição de sistemas de baterias estacionárias do sistema elétrico) e na reciclagem de seus elementos minerais, ainda que as tecnologias de geração de energia renovável (painéis solares e turbinas eólicas) também mereçam atenção (Hool, Helbig e Wierink, 2024;

8. World Energy Investment 2025/IEA (Licence: Terms of Use for Non-CC Material). Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-investment-2025-datafile>. Acesso em: 14 set. 2025. Essa fonte de dados de investimentos em energia soma investimentos em combustíveis (fósseis e não fósseis), eletricidade (geração e transmissão) e uso final (eficiência energética na construção civil, indústria e transportes).

IEA, 2024b; Xing *et al.*, 2025). A natureza recorrente do consumo de carros, em oposição à longa vida útil dos equipamentos das usinas de geração de energia, e a baixa maturidade das tecnologias de reciclagem constituem, assim, um imenso mercado potencial que requererá vultuosos investimentos em inovação, pesquisa e desenvolvimento (Collins *et al.*, 2024). Ademais, a sinalização de insuficiência de oferta mineral no futuro próximo em decorrência da expansão do mercado de carros eletrificados pode instigar desenvolvimentos tecnológicos que substituam elementos minerais – como é o caso das baterias de sódio em oposição às de lítio, pela abundância relativa do sódio – e/ou reduzam a intensidade mineral na manufatura das baterias.

Finalmente, vale mencionar que a crescente contribuição dos carros eletrificados para o sucesso da transição energética constitui fator de risco para a mitigação das mudanças climáticas. Projetos de infraestrutura energética dependem do Estado, basicamente, ainda que o setor privado contribua como investidor e operador nos sistemas elétricos. No mercado automotivo, a responsabilidade objetiva das ações governamentais é também importante, mas menos decisiva do que no caso dos sistemas elétricos. Incentivos tributários e ações regulatórias contribuem para o avanço desse mercado, mas, ao fim e ao cabo, é o mercado consumidor que materializará, ou não, as projeções e expectativas de substituição de veículos ICE por veículos eletrificados. Há que se levar em conta ainda que avanços nas tecnologias de combustão interna, especialmente naquelas relacionadas ao uso de biocombustíveis, podem redesenhar as tendências do mercado automotivo no futuro próximo, especialmente no Brasil.

REFERÊNCIAS

- ARAMENDIA, Emmanuel *et al.* Global energy consumption of the mineral mining industry: exploring the historical perspective and future pathways to 2060. **Global Environmental Change**, v. 83, 1^a dez. 2023.
- BERTHET, Etienne *et al.* Assessing the social and environmental impacts of critical mineral supply chains for the energy transition in Europe. **Global Environmental Change**, v. 86, 102841, maio 2024.
- CARR-WILSON, Savannah; PATTANAYAK, Subhrendu K.; WEINTHAL, Erika. Critical mineral mining in the energy transition: a systematic review of environmental, social, and governance risks and opportunities. **Energy Research & Social Science**, v. 116, 103672, out. 2024.
- COLLINS, Gabriel *et al.* Projecting demand for mineral-based critical materials in the energy transition for electricity. **Mineral Economics**, v. 37, n. 2, p. 245-263, jun. 2024.
- HOOL, Alessandra; HELBIG, Christoph; WIERINK, Gijsbert. Challenges and opportunities of the European Critical Raw Materials Act. **Mineral Economics**, v. 37, n. 3, p. 661-668, set. 2024.
- IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Fundamentos para políticas públicas em minerais críticos e estratégicos para o Brasil**. Brasília: Ibram, 2024.
- IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **The role of critical minerals in clean energy transitions**. Paris: IEA, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>.
- IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global energy and climate model: documentation 2024**. Paris: IEA, 2024a. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model>.
- IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Recycling of critical minerals: strategies to scale up recycling and urban mining**. Paris: IEA, 2024b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/recycling-of-critical-minerals>.
- IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global EV Outlook 2025: expanding sales in diverse markets**. Paris: IEA, 2025a. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025>.
- IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global Critical Minerals Outlook 2025**. Paris: IEA, 2025b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025>.
- IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY; OECD – ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **The role of traceability in critical mineral supply chains**. Paris: IEA; OECD Publishing, 2025. Disponível em: https://www.oecd.org/en/publications/the-role-of-traceability-in-critical-mineral-supply-chains_edb0a-451-en.html. Acesso em: 4 jul. 2025.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Geopolitics of the energy transition**: critical materials. Abu Dhabi: Irena, 2023.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Geopolitics of the energy transition**: energy security. Abu Dhabi: Irena, 2024.

KUZEMKO, Caroline *et al.* Rethinking energy geopolitics: towards a geopolitical economy of global energy transformation. **Geopolitics**, v. 30, n. 2, p. 531-565, 15 mar. 2025.

LEÃO, Rafael *et al.* O posicionamento do Brasil no comércio internacional de minerais críticos para a transição energética. **Radar**: tecnologia, produção e comércio exterior, n. 76, p. 7-12, 2024.

LEÃO, Rafael; OLIVEIRA, Mariano Laio de; CUNHA, Danúbia Rodrigues da. **Qual a importância do Brasil na cadeia global de minerais críticos da transição energética?** Uma análise sobre reservas, produção, comércio exterior e investimentos. Brasília: Ipea, 2025. Publicação preliminar.

MÅNBERGER, André; JOHANSSON, Bengt. The geopolitics of metals and metalloids used for the renewable energy transition. **Energy Strategy Reviews**, v. 26, 100394, nov. 2019.

PHAM, Linh; HSU, Kuang-Chung. Metals of the future in a world in crisis: geopolitical disruptions and the cleantech metal industry. **Energy Economics**, v. 141, 108004, jan. 2025.

RADEBE, Nomkhosi; CHIPANGAMATE, Nelson. Mining industry risks, and future critical minerals and metals supply chain resilience in emerging markets. **Resources Policy**, v. 91, 104887, abr. 2024.

RITCHIE, Hannah; ROSADO, Pablo; ROSER, Max. Breakdown of carbon dioxide, methane and nitrous oxide emissions by sector. **Our World in Data**, 10 jun. 2020.

SHIQUAN, Dou; DEYI, Xu. The security of critical mineral supply chains. **Mineral Economics**, v. 36, n. 3, p. 401-412, set. 2023.

SOVACOOOL, Benjamin K. *et al.* The decarbonisation divide: contextualizing landscapes of low-carbon exploitation and toxicity in Africa. **Global Environmental Change**, v. 60, 102028, 1º jan. 2020.

WATARI, Takuma *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, set. 2019.

XING, Xinran *et al.* Revealing global supply risk of critical minerals essential for low-carbon energy technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 498, 145160, mar. 2025.