

Uma análise sobre a influência geopolítica da transição energética na cadeia de valor global de materiais críticos

Bruna Targino¹· Paulo Gulelmo Souza²
Recibido: 17/11/2024 y Aceptado: 13/12/2024

153



1.-bruna.targino@ppe.ufrj.br
2.- gulelmo@yahoo.com.br



Resumen

A medida que el mundo avanza hacia la transición energética, la demanda por materiales críticos aumenta significativamente debido a la necesidad de nuevas tecnologías con baja huella de carbono. Así, la producción y el procesamiento de minerales y metales altamente concentrados geográficamente, considerados críticos, representan una dinámica geopolítica compleja de escasez y abastecimiento. En este sentido, el presente artículo discute la relación entre producción y procesamiento de materiales considerados críticos con el fin de analizar la concentración del mercado de estos materiales en todo el mundo. Para ello, se utiliza el Índice de Herfindahl-Hirschman (IHH) para evaluar el grado de concentración de los materiales y, en consecuencia, la producción de nuevas dependencias económicas y geopolíticas. Este análisis busca identificar riesgos asociados con la productividad y la concentración de estos recursos, esenciales para la transición energética.

PALABRAS CLAVE: Transición energética, Minerales críticos, Índice de concentración

Abstract

As the world moves towards renewable energy sources, the demand for critical materials increases significantly due to the need for new low-carbon technologies. In this context, this article discusses the association between production and processing of materials considered critical in order to analyze their market concentration around the world. For this purpose, the Herfindahl-Hirschman Index (HHI) is used to assess the degree of concentration of these materials and, consequently, the production of new economic and geopolitical dependencies. This analysis aims to identify the challenges associated with the lack and concentration of these resources, which are essential for the energy transition.

KEYWORDS: Energy transition, Critical minerals, Concentration index

1. INTRODUÇÃO

Para alcançar as metas climáticas estabelecidas no Acordo de Paris, a descarbonização de diversos setores como transporte, energia e a economia global, como um todo, tornou-se uma prioridade para os governos (Hache, Gondia Seck & Guedes, 2023). À medida que o mundo avança para o uso de energias renováveis e de tecnologias com menor pegada de carbono, surgem novos desafios associados ao aumento da demanda por materiais essenciais para a transição energética (IRENA, 2021). Nesse contexto, há um objetivo em comum: a reestruturação de sistemas energéticos, visando a produção de energia limpa, com o uso e desenvolvimento, por exemplo, de painéis solares e baterias para veículos elétricos (Greim et al., 2020).

156 Ao longo da história, o cenário geopolítico mundial esteve associado à concentração de reservas de petróleo, onde os maiores produtores possuíam vantagens estratégicas sobre a cadeia de suprimentos (Månberger & Johansson, 2019). A partir da ascensão das energias renováveis, a produção e o processamento de minerais e metais altamente concentrados geograficamente, considerados críticos, representam uma dinâmica geopolítica complexa de escassez e abastecimento (Månberger & Johansson, 2019). Essa mudança sugere que países com grandes reservas e com grande capacidade no refino desses minerais críticos podem emergir enquanto atores estratégicos na geopolítica global, influenciando não apenas o mercado, mas também as cadeias de valor associadas à transição energética.

Nesse sentido, o objetivo deste estudo é analisar como a transição energética afeta o mercado de materiais críticos, considerando a distribuição de reservas desses materiais, assim como seu processamento ao redor do mundo. Isto é, avaliar se a distribuição global desses materiais representa uma relação de dependência que pode ser utilizada com objetivos geopolíticos, visto que são considerados materiais críticos. Para tanto, utiliza-se o Índice de Herfindahl-Hirschman (IHH)

a fim de avaliar o grau de concentração tanto das reservas quanto do processamento desses materiais.

Na primeira seção deste estudo, apresenta-se a breve discussão em torno do conceito de reserva e recurso de materiais críticos diante da transição energética, assim como discutir a demanda por esses materiais. Em seguida, descreve-se a abordagem metodológica utilizada para atingir os objetivos descritos anteriormente. O IHH foi aplicado aos seguintes produtos: níquel, lítio, cobalto e cobre. Por fim, apresenta-se uma discussão em torno dos resultados obtidos para cada um dos materiais críticos avaliados, baseando-se no índice IHH. Essa análise discute a relação da concentração da produção dos materiais selecionados e o seu processamento, a fim de identificar quais países se destacam na cadeia de valor e, conseqüentemente, sua influência geopolítica sobre o setor.

2. MATERIAIS CRÍTICOS PARA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA: UMA DISCUSSÃO SOBRE RECURSOS E RESERVAS

Ao longo da história, a transição para outras fontes de energia esteve associada à demanda por materiais (Zotin, Rochedo & Szklo, 2023). À medida que a exploração dos minerais avançou, tornou-se possível desenvolver novas aplicações e melhorar o desempenho técnico de diversos produtos (National Research Council, 2008). Desde a transição do carvão para o petróleo, a expansão das indústrias e o surgimento de novas tecnologias possibilitaram o surgimento de sistemas energéticos (Fouquet, 2009).

Durante a Revolução Industrial, a máquina vapor e a expansão das ferrovias aumentaram a demanda por aço, cobre e outros minerais (Yang et al. 2021). O acesso às reservas de carvão e às tecnologias embutidas nesse processo também contribuíram para que a Inglaterra obtivesse uma posição de prestígio ao longo do século XIX, consolidando-se como uma potência industrial e econômica (Barak 2015). Da mesma forma, motores a combustão interna, automóveis e petroquímicos impulsionaram a expansão da indústria do petróleo (Groß et al., 2022). O acesso a combustíveis fósseis conduziu grande parte da riqueza de países como Estados Unidos e a antiga União Soviética durante o século XX (Crikemans, 2023).

Diante desse cenário, a ascensão de energias renováveis na atual transição energética reitera o debate sobre a relevância da inovação e dos avanços tecnológicos no mercado de energia e suas dinâmicas geopolíticas (Su et al., 2021). Novas rotas comerciais e uma maior demanda por matérias-primas consideradas relevantes para fabricação de tecnologias de energia renovável intensificam a concorrência para controlar determinados materiais, considerados estratégicos para garantir a transição (Hatipoglu, Al Muhanna & Efirid 2020). Ao mesmo tempo, as áreas de produção de materiais e minerais críticos também exercem sua influência no mercado de energia de modo que países produtores e consumidores enfrentam riscos geopolíticos

associados à dependência de materiais (Månberger & Johansson 2019).

A disponibilidade desses minerais e materiais na natureza para futura extração pode ser classificada como recursos ou reservas, dependendo do grau de conhecimento geológico, maturidade tecnológica e nível de certeza sobre a viabilidade comercial para explorá-los (Lundaev et al., 2023). A jazida de minerais cuja extração é econômica e tecnologicamente viável é denominada como reserva (Roonwal, 2019). Esses aspectos fundamentais diferenciam as reservas dos recursos, que consistem na disposição de minerais ou materiais alocados na natureza que são inacessíveis devido a questões econômicas, tecnológicas e ambientais (National Research Council, 2008). É necessário destacar que esses conceitos não consistem em uma categorização fixa, visto que sua classificação enquanto recursos ou reservas podem variar de acordo com revisões técnicas, avanços tecnológicos ou a viabilidade econômica de sua exploração (Lundaev et al., 2023).

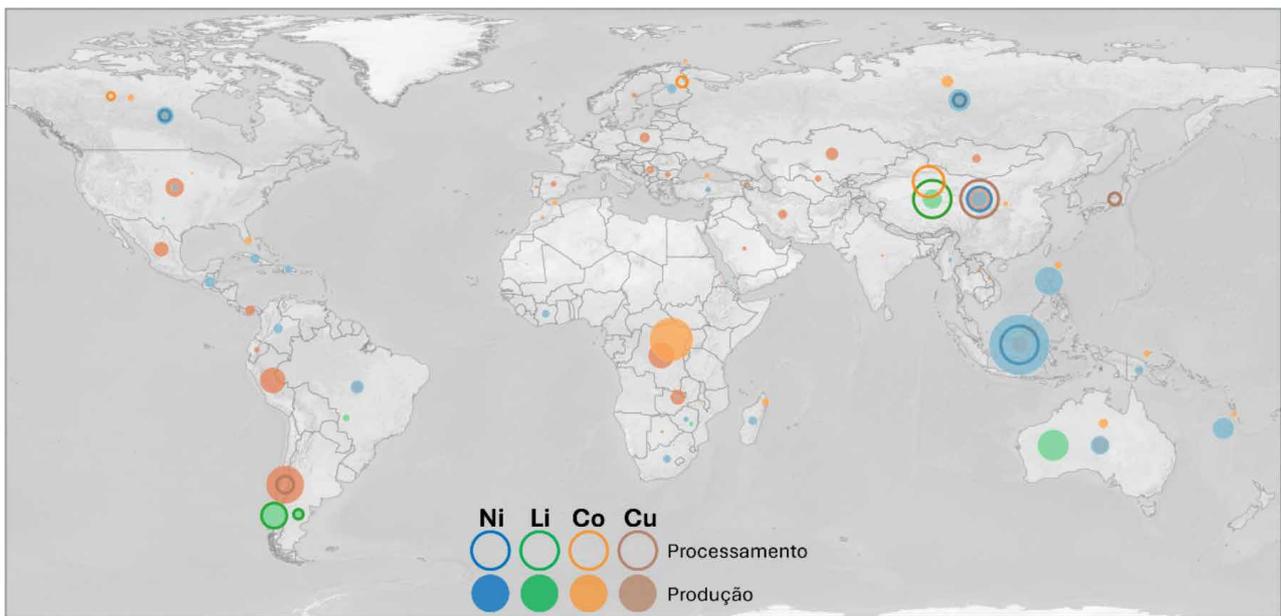
Da mesma forma, a compreensão sobre o nível de criticidade de materiais também pode modificar-se ao longo do tempo. Na literatura, o termo de criticidade é amplo, pois sua definição é reavaliada à medida que a preocupação em torno do acesso à oferta desses materiais é crescente, devido ao aumento da demanda (Greim et al., 2020). A segurança do abastecimento de materiais críticos está associada à sua abundância e, conseqüentemente, à sua escassez. Isso ocorre porque a concentração da oferta desses materiais, em determinadas regiões, classifica-os como críticos devido à importância que possuem para a produção de tecnologias limpas, principalmente em um contexto de transição energética (Lundaev et al., 2023).

Países dependentes da importação de materiais se esforçam para garantir o fornecimento de

energia e outros recursos necessários para suas economias. Para tanto, adotam estratégias que garantam seu acesso aos materiais no mercado internacional a fim de adquirir matéria-prima para produção de tecnologias essenciais para a transição energética (Su et al., 2021). Por outro lado, os países que controlam o processamento também utilizam seus recursos para aumentar sua influência política tanto a um nível regional quanto global (Månberger & Johansson 2019). Nesse sentido, a alta concentração da ocorrência

de depósitos minerais e produção de materiais e minerais críticos em poucos países pode implicar na dependência de tais importações para países que consomem esses materiais (Korinek & Kim 2011). A figura 1 abaixo ilustra objetivamente essa questão:

Figura 1 - Produção e processamento de suprimentos para materiais críticos selecionados em 2022 (Ni-Níquel, Li-Lítio, Co-Cobalto e Cu-Cobre)

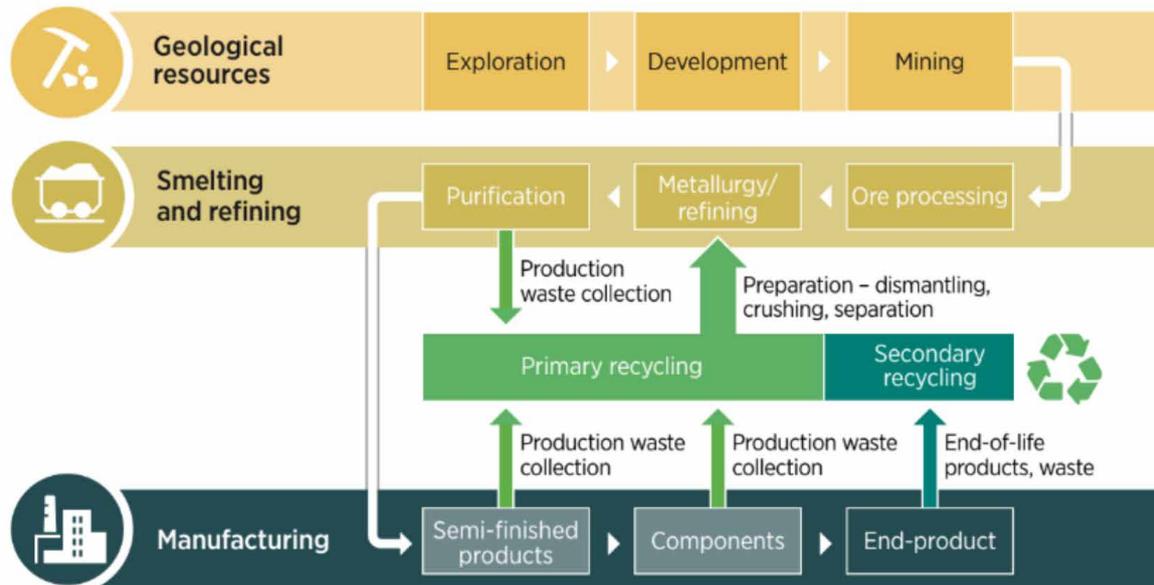


Fonte: Elaboração própria, com dados da WMD -World Mining Data (2024)

O desenvolvimento de baterias de lítio desempenha um papel relevante na descarbonização de certos setores (Hache, Sokhna Seck & Guedes 2023). Outros minerais críticos como cobalto, níquel e cobre também são relevantes para o desenvolvimento de redes elétricas, armazenamento de energia, tecnologias de geração fotovoltaicas e eólicas, assim como sua aplicação em outras tecnologias de baixo carbono, como na produção de hidrogênio (Grandell et al., 2016). Como um dos setores demandantes, tem-se o mercado de baterias recarregáveis de íon lítio (IEA, 2018). Em 2022, por exemplo, a venda de carros elétricos ultrapassou 10 milhões de unidades, enquanto a capacidade dos sistemas de armazenamento dobrou no

mesmo período. Entre 2017 e 2022, o setor de energia foi o principal fator que provocou um aumento de 70% na demanda por cobalto, 40% por níquel e a uma triplicação na procura por lítio (IEA, 2023).

A **figura 2** abaixo ilustra a cadeia de abastecimento de materiais críticos, considerando suas etapas principais, que envolvem desde a prospecção mineral, extração das minas até o produto final.



Fonte: IRENA (2023)

159

O diagrama ilustra a interconexão entre essas diferentes etapas. Primeiramente inicia-se com a exploração, caracterização e classificação enquanto reserva até culminar na etapa de lavra mineral. Após a extração, os materiais são transportados para plantas de processamento mineral, onde são convertidos em minério concentrado, que variam dependendo da matéria-prima. O refino inclui as fases de purificação e ultra-processamento dos minerais, crucial para retirar as impurezas dos metais, preparando-os para usos industriais. Cada vez mais, há uma discussão sobre a reciclagem desses produtos, incluindo determinados resíduos gerados ao longo de seu ciclo de vida. A figura 2 também demonstra a dinâmica de interdependência na cadeia de abastecimento de materiais críticos (IRENA, 2023).

Nesse contexto, os países buscam garantir não apenas o abastecimento, mas posicionar-se como players relevantes nesse mercado. O Departamento de Defesa norte-americano, por exemplo, concedeu \$20,6 milhões em 2023 para avançar na exploração de níquel em Minnesota. Além disso, o país investiu \$90 milhões para apoiar a reabertura de uma mina de lítio na Carolina do

Norte para retomar as operações até 2035 (U.S. Geological Survey 2023). Nos últimos anos, a China também demonstrou sua preocupação com materiais críticos. O país investiu em inovações tecnológicas para descarbonização, tornando-se um dos atores mais relevantes no registro de patentes na área de engenharia, química e transportes, de acordo com o relatório Global Innovation Index (WIPO, 2023). Apesar de ser desafiador prever a demanda futura por materiais críticos, especialmente a longo prazo, estima-se que as transformações necessárias para a transição energética produzam novas rotas comerciais e outras dinâmicas geopolíticas (Hache, Sokhna Seck & Guedes 2023).

3. MÉTODO

Nesta seção, descreve-se a abordagem utilizada para analisar como a transição energética afeta o mercado de materiais críticos. Para tanto, considera-se a concentração da produção e do processamento de minerais críticos a fim de avaliar se sua distribuição geográfica representa uma relação de dependência entre países, associada ao uso desses materiais. Optou-se por analisar os seguintes produtos: cobre, lítio, níquel e cobalto. Essa escolha deve-se ao uso desses materiais na produção de tecnologias necessárias para a transição energética, como turbinas, painéis solares e baterias para veículos elétricos. Para avaliar o grau de dependência, utilizou-se o Índice de Herfindahl-Hirschman (IHH) para medir a concentração desses mercados.

160 Ao longo deste estudo, analisou-se a produção e o processamento dos materiais críticos selecionados a fim de delimitar o foco da investigação, que se propõe a avaliar o mercado atual de materiais – desconsiderando as possibilidades de extração futura em sua análise. Essa escolha metodológica pretende facilitar a análise da capacidade de produção atual do mercado de materiais críticos, visto que o conceito de reservas considera o total estimado que poderá ser extraído no futuro.

Portanto, focou-se na análise da atividade de extração, em vez de considerar as reservas, assumindo que a extração de materiais implica na disponibilidade de reservas para tal atividade.

Nesse sentido, a primeira seção deste trabalho consiste na discussão sobre o uso do conceito de recursos e reservas, assim como discutir a demanda por esses materiais. Essa etapa baseia-se na revisão da literatura sobre o tema, abordando o funcionamento do mercado de materiais críticos. Em seguida, calcula-se o Índice de Herfindahl-Hirschman (IHH) para cada produto mencionado anteriormente desde 2020 até 2023 para acompanhar o comportamento do IHH ao longo do tempo. Isto é, compreender a dinâmica do mercado de materiais críticos tanto na extração quanto no processamento. Os valores considerados para análise foram retirados do relatório Critical Minerals Market Review 2023 produzido pela International Energy Agency – IEA, publicado em 2023. Por fim, discute-se os resultados obtidos ao longo da realização deste estudo.

3.1. Índice de Concentração

Índices de concentração pretendem indicar o grau de concorrência em determinado mercado. Quanto maior o valor do índice de concentração, menor é o grau de concorrência e mais concentrado estará o poder de mercado virtual da indústria (Resende, p. 55, 2013). Nesse sentido, uma maior concentração industrial significa que há desigualdades nesse mercado, o que poderá implicar em maior grau de concentração.

Diferentes métricas podem ser utilizadas para medir o grau de concentração de mercado. Dentre as mais comuns, destacam-se as razões de concentração (CR), que pode ser definida pela Fórmula 3.1:

$$CR(k) = \sum_{i=1}^k s_i \quad (3.1)$$

O CR(k) indica a parcela que as firmas possuem em determinado mercado. Por exemplo, CR (5) trata-se das 5 maiores firmas atuantes (Naldi & Flamini, 2014). Outra ferramenta analítica é o Índice de Herfindahl–Hirschman (IHH), que busca mensurar a dimensão das firmas em relação à indústria que atuam. O IHH, portanto, permite

avaliar o grau de concentração do mercado de determinado setor (Resende, 2013).

Tal expressão pode ser definida pela Fórmula 3.2:

$$HH = \sum_{i=1}^n s_i^2. \quad (3.2)$$

Elevar o market share de cada empresa ao quadrado permite atribuir um peso maior às empresas relativamente maiores. Assim, quanto mais elevado for o IHH, maior será a concentração em determinado mercado. Isto é, haverá menor concorrência entre os produtores (Resende, 2013). Como o IHH trata-se das parcelas de

mercado, há três faixas para avaliar o IHH considerando processos de fusões, assim como os valores potenciais do índice após a fusão entre dois atores. Dessa forma, compreende-se que:

Tabela 1: Níveis de concentração de mercado.

| Nível de concentração | IHH |
|-----------------------|----------------------------|
| Baixo | $0 \leq HH < 1.000$ |
| Moderado | $1.000 \leq HH \leq 1.800$ |
| Alto | $HH > 1.800$ |

Fonte: Oliveira (2023)

3.2. Dados utilizados

Diante das informações apresentadas até aqui, esta seção explora os dados obtidos sobre a concentração de materiais críticos, considerando

a produção e o processamento de cobre, lítio, níquel e cobalto

3.2.1. Cobre

A concorrência de grandes depósitos minerais de cobre concentra-se no Chile, Peru, República Democrática do Congo (RDC) e na China, respectivamente. A China desempenha um papel dominante no processamento de cobre, atuando como principal país neste mercado. De modo geral, a extração manteve-se estável nos

últimos anos, com o aumento da participação de outros países tanto na extração quanto no processamento.

Em seguida, o Chile e o Japão também se destacam em relação ao processamento. Nota-se que, ao longo dos anos, a extração de cobre nos

países selecionados mostrou-se relativamente constante. O mesmo ocorre no processamento, com um crescimento menos acelerado em 2023. A China está aumentando sua capacidade de processamento de forma consistente, o que pode indicar um maior domínio no mercado global de

cobre processado. A expansão da produção no Peru e RDC sugere um aumento na importância desses países na cadeia de suprimento de cobre. A tabela 2 e 3 abaixo resumem os dados de produção e processamento de cobre de alguns países.

Tabela 2: Produção de cobre

| Extração de Cobre em Mt | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Chile | 5.7 | 5.6 | 5.4 | 5.6 |
| Peru | 2.1 | 2.3 | 2.5 | 2.58 |
| RDC | 1.6 | 1.8 | 2.1 | 2.42 |
| China | 1.9 | 1.5 | 1.2 | 1.9 |
| Outros | 9.7 | 9.8 | 10.8 | 10.2 |

Fonte: IEA (2023)

Tabela 3: Processamento de cobre

| Processamento de Cobre em Mt | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
|-------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| China | 9.9 | 10.4 | 10.5 | 11.2 |
| Chile | 2.3 | 2.3 | 2.2 | 2.2 |
| Japão | 1.8 | 1.4 | 1.6 | 1.6 |
| Outros | 10.1 | 10.4 | 11 | 11.4 |

Fonte: IEA (2023)

3.2.2. Lítio

Os principais países que possuem depósitos minerais de lítio são Austrália, Chile, China e Argentina. A Austrália destaca-se na extração, enquanto a China domina o processamento. Desde 2020, a capacidade de processamento da China aumentou de 265 kt para 604 kt em 2023, ou seja, expandiu-se significativamente. A participação de outros países cresceu nos últimos

anos, o que pode indicar uma maior diversificação na capacidade do processamento global de lítio, embora ainda seja pouco expressiva.

A tabela 3 e 4 abaixo resumem os dados de produção e processamento de lítio de alguns países.

Tabela 4: Produção de lítio

| Extração de Lítio em kt LCE | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Austrália | 200 | 264 | 363 | 506 |
| Chile | 113 | 154 | 202 | 234 |
| China | 55 | 74 | 131 | 126 |
| Argentina | 32 | 36 | 36 | 54 |
| Outros | 9.7 | 9.8 | 10.8 | 10.2 |

Fonte: IEA (2023)

Tabela 5: Processamento de lítio

| Processamento de Lítio em kt LCE | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
|----------------------------------|------|------|------|------|
| China | 265 | 340 | 457 | 604 |
| Chile | 109 | 143 | 206 | 234 |
| Argentina | 33 | 34 | 31 | 60 |
| Outros | 4 | 7 | 9 | 42 |

Fonte: IEA (2023)

3.2.3. Níquel

A Indonésia concentra os principais depósitos minerais de níquel e está emergindo como principal líder no processamento, aumentando sua capacidade de 0.64 Mt em 2020 para 1.67 Mt em 2023. Rússia e Canadá também se destacam no processamento de níquel, mantendo-se relativamente estável nos últimos anos. Embora a China seja relevante neste mercado, o país apresentou um declínio na sua participação no processamento de níquel, de 0.67 Mt em 2020

para 0.43 Mt em 2023. Essa mudança pode significar um maior protagonismo da Indonésia neste mercado. A tabela 5 e 6 abaixo resumem os dados de produção e processamento de níquel de alguns países.

163

Tabela 6: Produção de níquel

| Extração de Níquel em Mt | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
|--------------------------|-------|-------|------|------|
| Indonésia | 0.77 | 1.03 | 1.58 | 1.81 |
| Filipinas | 0.33 | 0.39 | 0.31 | 0.41 |
| Rússia | 0.23 | 0.202 | 0.19 | 0.23 |
| NC | 0.207 | 0.188 | 0.21 | 0.21 |
| Outros | 0.863 | 0.89 | 0.91 | 0.99 |

Fonte: IEA (2023)

Tabela 7: Processamento de níquel

| Processamento de Níquel em Mt | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
|-------------------------------|------|------|-------|------|
| Indonésia | 0.64 | 0.89 | 1.377 | 1.67 |
| China | 0.67 | 0.7 | 0.563 | 0.43 |
| Rússia | 0.15 | 0.07 | 0.15 | 0.15 |
| Canadá | 0.13 | 0.11 | 0.12 | 0.13 |
| Outros | 0.95 | 0.92 | 0.96 | 0.94 |

Fonte: IEA (2023)

3.2.4. Cobalto

A República Democrática do Congo (DRC) lidera a produção de cobalto, apresentando um crescimento de 103 kt em 2020 para 168 kt em 2023, consolidando-se como o principal produtor mundial. A Indonésia, embora tenha permanecido relativamente estável, segue como um dos produtores mais relevantes. A categoria que inclui outros países mostrou-se mais expressiva nos

últimos anos, contribuindo para a oferta global. A China destaca-se no processamento de cobalto, crescendo de 95 kt em 2020 para 140 kt em 2023. A tabela 7 e 8 abaixo resumem os dados de produção e processamento de cobalto de alguns países.

Tabela 8: Produção de cobalto

| Extração de Cobalto em kt | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
|---------------------------|------|------|------|------|
| DRC | 103 | 121 | 147 | 168 |
| Indonésia | 6 | 5 | 6 | 7 |
| Filipinas | 5 | 6 | 6 | 5 |
| Cuba | 4 | 5 | 6 | 6 |
| Outros | 26 | 25 | 35 | 47 |

Fonte: IEA (2023)

Tabela 9: Processamento de cobalto

| Processamento de Cobalto em kt | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
|--------------------------------|------|------|------|------|
| China | 95 | 114 | 126 | 140 |
| Finlândia | 13 | 15 | 15 | 14 |
| Canadá | 6 | 5 | 7 | 9 |
| Outros | 19 | 18 | 16 | 22 |

Fonte: IEA (2023)

4. RESULTADOS

Diante das informações apresentadas até aqui, esta seção explora os resultados obtidos sobre a concentração de materiais críticos, considerando a produção e o processamento de cobre, lítio, níquel e cobalto

4.1. Índice de Concentração

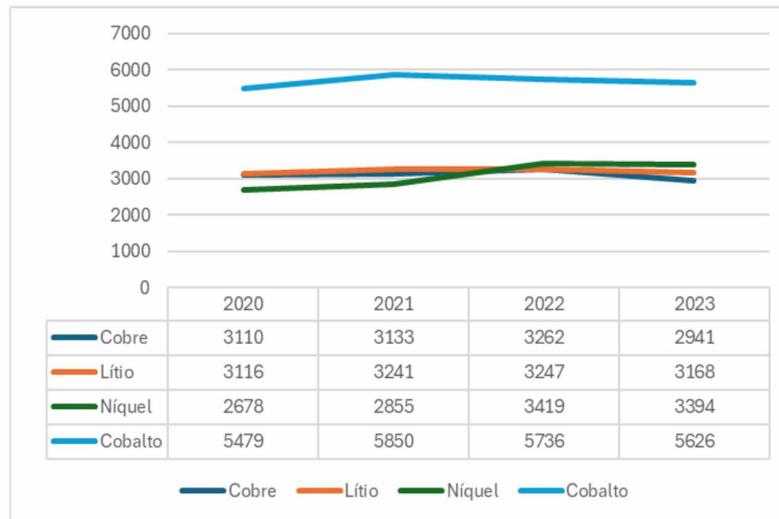
As figuras abaixo representam o comportamento do IHH para cobre, lítio, níquel e cobalto, respectivamente, desde 2020 até 2023, de acordo com dados estabelecidos pela IEA (2023).

O gráfico 1 demonstra que o cobalto apresenta a maior concentração no que se refere à extração, sugerindo que poucos países controlam a maior parte das minas em operação de cobalto.

Apesar de uma pequena redução em 2022, o mercado de cobalto mantém-se altamente concentrado. O IHH de lítio também é elevado e apresenta uma tendência relativamente estável. Quanto ao níquel, houve uma maior concentração

principalmente a partir de 2022. Por fim, o índice de concentração de cobre mantém-se elevado, apesar de uma queda em 2023.

Figura 3 - IHH das reservas de materiais críticos



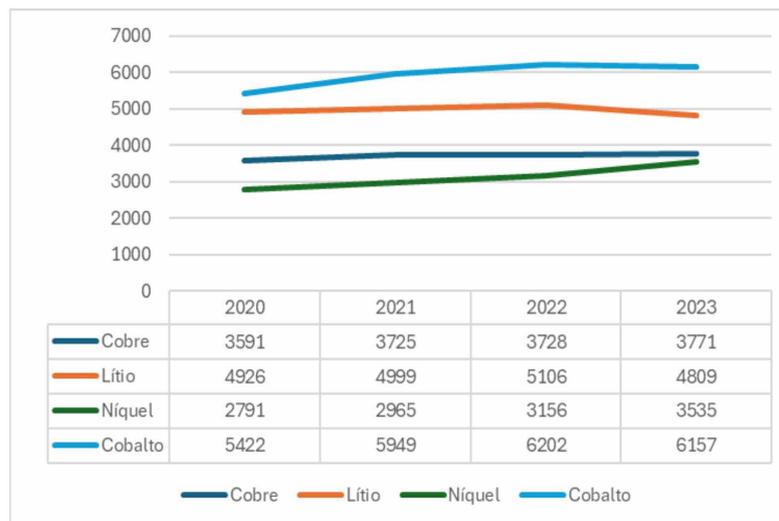
Fonte: Elaboração própria.

165

O gráfico 2 compara o comportamento do IHH no que se refere ao processamento desses materiais ao longo dos anos. O cobalto apresenta o maior índice de concentração, demonstrando que poucos países dominam o seu processamento. O níquel, embora relativamente menos concentrado em 2020, apresentou um aumento em 2023. O índice

de concentração de cobre é elevado, mantendo-se constante. Por fim, o processamento de cobre é altamente concentrado, no entanto, manteve-se relativamente estável durante o período analisado.

Figura 4 - IHH do processamento de materiais críticos



Fonte: Elaboração própria.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E COMENTÁRIOS FINAIS

Ao longo da realização deste trabalho, analisou-se os principais players do mercado de materiais críticos, considerando a distribuição global da produção e do processamento de níquel, cobalto, cobre e lítio. Dado que as energias renováveis compõem as estratégias globais para alcançar metas de descarbonização, optou-se por investigar se o aumento da demanda por materiais críticos pode produzir uma relação de dependência entre países que dominam essas cadeias de valor. Essa escolha deve-se à importância desses materiais para produção de tecnologias renováveis, essenciais para a transição energética e, conseqüentemente, para que os países sejam capazes de cumprir suas estratégias de mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

166 A Agência Internacional para as Energias Renováveis – IRENA declarou que é pouco provável que os materiais críticos reproduzam a dinâmica geopolítica dos combustíveis fósseis, alegando que as reservas desses materiais são abundantes e podem ser processadas em diversos locais (IRENA, 2023). No entanto, ao avaliar o Índice de Herfindahl-Hirschman (IHH) do mercado de níquel, lítio, cobre e cobalto no período entre 2020 e 2023, constatou-se que tanto a extração quanto o processamento dos materiais selecionados são altamente concentrados, mantendo-se estáveis durante o período analisado. O alto índice de concentração do IHH indica que há pouca competição entre os países que compõem essa cadeia de valor. Ou seja, poucos países dominam o mercado dos materiais críticos analisados.

Assim, identificou-se que os principais volumes produzidos se concentram nos países em desenvolvimento, com exceção da Austrália, que possui grandes reservas de lítio. O Chile também se destaca na extração de lítio e concentra as principais minas em operação de cobre e lítio. A República Democrática do Congo lidera na extração de cobalto, enquanto a Indonésia destaca-se tanto na produção quanto no processamento de níquel. O Peru é um dos

países mais relevantes em termos de volumes produzidos de cobre, assim como o Chile. Por outro lado, o processamento de níquel, cobalto, cobre e lítio é concentrado principalmente na China.

A análise do IHH ao longo do tempo revela que a atividade de mineração de materiais críticos permanece altamente concentrada em certas áreas geográficas. Essa concentração significa que a oferta global desses materiais depende fortemente de um pequeno número de países, evidenciando uma falta de diversificação. Da mesma forma, o processamento desses materiais é igualmente concentrado, com a capacidade de refino predominantemente localizada em poucos países.

Por exemplo, a China possui uma posição importante, controlando uma parte significativa da capacidade global de processamento de lítio e cobalto. Tal concentração amplifica os riscos associados à cadeia de suprimentos, pois qualquer interrupção na capacidade de refino desses poucos países pode impactar significativamente a disponibilidade global de materiais processados. Esse cenário sugere uma dinâmica de dependência e vulnerabilidade para países importadores que dependem do fornecimento desses materiais para fins industriais, tecnológicos e energéticos. A interrupção no fornecimento desses materiais processados pode produzir consequências significativas para a cadeia de valor global, visto que são necessários para o desenvolvimento tecnológico inerente à transição energética.

Como apontam Sattich et al. (2023), conquistas geopolíticas vinculadas às energias renováveis parecem depender, em grande parte, de avanços industriais. Nesse sentido, o domínio sobre esses mercados pode oferecer vantagens competitivas em termos de inovação e avanços tecnológicos. Países que controlam a mineração e o processamento de materiais críticos podem posicionar-se como líderes globais

no fornecimento de materiais críticos para a transição energética, influenciando não apenas o mercado, mas também a geopolítica global. Apesar de possuírem uma geografia de comércio única que, em nível agregado, envolva os países em uma rede ampla de interdependência, a demanda constante por materiais, componentes ou produtos acabados pode tornar cadeias de abastecimento mais vulneráveis a riscos geopolíticos. Por fim, essa análise não sugere que os materiais críticos reproduzam a geopolítica dos combustíveis fósseis em torno da distribuição geográfica de suas reservas. No entanto, indica que a transição energética pode reconfigurar rotas comerciais e influenciar novas dinâmicas de poder global.

Ao analisar os resultados deste estudo, é fundamental considerar suas limitações. O foco na extração, sem incluir o total estimado das

reservas, compromete uma interpretação mais detalhada de longo prazo sobre o mercado de materiais críticos, visto que o surgimento de novas tecnologias pode viabilizar a produção em outras regiões cuja extração era considerada inviável. Essa distinção é crucial porque o foco do estudo na extração atual pode não refletir o potencial de produção alternativo de longo prazo com a prospecção de novas jazidas e reclassificação de recursos. Para uma melhor análise, examinar como o surgimento de novas tecnologias de mineração e processamento viabiliza a extração em novas áreas, reduzindo o custo unitário de produção, contribui para compreender a dinâmica do mercado de materiais críticos.

6. REFERENCES

Barak, On. "OUTSOURCING: ENERGY AND EMPIRE IN THE AGE OF COAL, 1820-1911." *International Journal of Middle East Studies* 47, no. 3 (2015): 425–45. <http://www.jstor.org/stable/43997991>.

Criekemans, David. (2023). "Geopolitics, Goeconomics and Energy Security in an Age of Transition towards Renewables." In *Handbook on the Geopolitics of the Energy Transition*. <https://doi.org/10.4337/9781800370432>.

Emmanuel Hache, Gondia Sokhna Seck, Fernanda Guedes, and Charlene Barnet. (2023). "Critical Materials – New Dependencies and Resource Curse?," 12.

Fouquet, R., (2009). A brief history of energy. In: Evans, J., Hunt, L.C. (Eds.), *International Handbook of the Economics of Energy*. Edward Elgar Publications, Cheltenham, UK, and Northampton, MA, USA.

Grandell, Leena, Antti Lehtilä, Mari Kivinen, Tiina Koljonen, Susanna Kihlman, and Laura S. Lauri. (2016). "Role of Critical Metals in the Future Markets of Clean Energy Technologies." *Renewable Energy* 95: 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.102>.

Greim, Peter, A. A. Solomon, and Christian Breyer. (2020). "Assessment of Lithium Criticality in the Global Energy Transition and Addressing Policy Gaps in Transportation." *Nature Communications* 11 (1): 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18402-y>.

Hatipoglu, Emre, Saleh Al Muhanna, and Brian Efirid. (2020). "Renewables and the Future of Geopolitics: Revisiting Main Concepts of International Relations from the Lens of Renewables." *Russian Journal of Economics* 6 (4): 358–73. <https://doi.org/10.32609/J.RUJE.6.55450>.

IEA. (2018). "Global EV Outlook 2018 - Towards Cross-Modal Electrification." <https://doi.org/10.1787/9789264302365-en>.

IEA. (2023). "Critical Minerals Market Review 2023." *Critical Minerals Market Review 2023*. <https://doi.org/10.1787/9cdf8f39-en>.

IRENA. (2021). *Securing Critical Minerals for the Energy Transition*. Canadian Mining Journal. Vol. 142.

IRENA. (2023). "Geopolitics of the Energy Transition: Critical Materials." *Journal of Geographical Sciences*. Vol. 33. <https://doi.org/10.1007/s11442-023-2101-2>.

Korinek, Jane, and Jeonghoi Kim. (2011). "Export Restrictions on Strategic Raw Materials and Their Impact on Trade and Global Supply." *Journal of World Trade* 45 (2): 255–81. <https://doi.org/10.54648/trad2011009>.

Lundaev, Vitalii, A. A. Solomon, Tien Le, Alena Lohrmann, and Christian Breyer. (2023). "Review of Critical Materials for the Energy Transition, an Analysis of Global Resources and Production Databases and the State of Material Circularity." *Minerals Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108282>.

Månberger, André, and B. Johansson. (2019). "The Geopolitics of Metals and Metalloids Used for the Renewable Energy Transition." *Energy Strategy Reviews* 26 (December 2018). <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100394>.

Marianne Zotin, Pedro Rochedo, Joana Portugal-Pereira, and Roberto Schaefer Alexandre Szklo. (2023). "CRITICAL CONNECTIONS IN MATERIAL TRANSITIONS AND ENERGY TRANSITIONS." In , 7823–30.

Naldi, Maurizio, and M. Flamini. (2014). The CR4 Index and the Interval Estimation of the Herfindahl-Hirschman Index: An Empirical Comparison.

National Research Council. (2008). "Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy." *Society* 11: 790.

Oliveira, Isabela Fernandes De. (2023). "MERCADO BRASILEIRO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS: UMA AVALIAÇÃO A PARTIR DA INTEGRAÇÃO DA ANÁLISE PESTAL AO MODELO ESTRUTURA-CONDUTA-DESEMPENHO (ECD)."

Resende, Marcelo; Hugo Boff. (2013). "Economia Industrial." In *Revista de Administração de Empresas*, 35:86–87. <https://doi.org/10.1590/s0034-75901995000500012>.

Robert Groß, Jan Streeck, Nelo Magalhães, Fridolin Krausmann, Helmut Haberl, Dominik Wiedenhofer, (2022). How the European recovery program (ERP) drove France's petroleum dependency, 1948–1975, *Environmental Innovation and Societal Transitions*, Volume 42, 2022, Pages 268-284, ISSN 2210-4224. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2022.01.002>.

Roonwal, G S. (2019). *Springer Geology Mineral Exploration: Practical Application*. <http://www.springer.com/series/10172>.

Su, Chi Wei, Khalid Khan, Muhammad Umar, and WeiKe Zhang. (2021). "Does Renewable Energy Redefine Geopolitical Risks?" *Energy Policy* 158 (August). <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112566>

Thomas Sattich, Stephen Agyare e Oluf Langhelle. (2023). Solar powers – renewables and sustainable development around the world or geostrategic competition? *Handbook on the Geopolitics of the Energy Transition*. <https://doi.org/10.4337/9781800370432>

U.S. Geological Survey. (2023). *Mineral Commodities Summary 2024. Mineral Commodity Summaries 2023*. <http://pubs.er.usgs.gov/publication/mcs2023>.

WMD. (2024). *World Mining Data*. https://www.world-mining-data.info/?World_Mining_Data___Data_Section.

WIPO. (2023). *Global Innovation Index 2023 Innovation in the Face of Uncertainty. International Journal of Technology*. Vol. 47. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2019.01.002><https://doi.org/10.1016/j.cstp.2023.100950><https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2021.04.007><https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102816><https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.03.015><https://doi.org/10.1016/j.eastsj.20>

Yang, Jianfeng, Yun Yu, Teng Ma, Cuiguang Zhang, and Quan Wang. (2021). "Evolution of Energy and Metal Demand Driven by Industrial Revolutions and Its Trend Analysis." *Chinese Journal of Population Resources and Environment* 19 (3): 256–64. <https://doi.org/10.1016/j.cjpre.2021.12.028>.

7. APÊNDICE A: TABELAS DE MARKET SHARE E S²

Tabela 10: Market Share e S² da extração do cobre

| País | Market Share | | | | S ² | | | |
|-------|--------------|------|------|------|----------------|---------|---------|---------|
| | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
| Chile | 27% | 27% | 25% | 25% | 736.73 | 711.11 | 602.48 | 608.59 |
| Peru | 10% | 11% | 11% | 11% | 100.00 | 119.95 | 129.13 | 129.18 |
| DRC | 8% | 9% | 10% | 11% | 58.05 | 73.47 | 91.12 | 113.65 |
| China | 9% | 7% | 5% | 8% | 81.86 | 51.02 | 29.75 | 70.06 |
| Outro | 46% | 47% | 49% | 45% | 2133.56 | 2177.78 | 2409.92 | 2019.06 |

Tabela 11: Market Share e S² do processamento do cobre

| País | Market Share | | | | S ² | | | |
|--------|--------------|------|------|---------------|----------------|---------|---------|---------|
| | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 estimado | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
| China | 41% | 42% | 42% | 42% | 1687.47 | 1801.92 | 1722.41 | 1799.82 |
| Chile | 10% | 9% | 9% | 8% | 91.08 | 88.13 | 75.61 | 69.44 |
| Japão | 7% | 6% | 6% | 6% | 55.78 | 32.65 | 39.99 | 36.73 |
| Outros | 42% | 42% | 43% | 43% | 1756.34 | 1801.92 | 1890.36 | 1864.67 |

Tabela 12: Market Share e S² da extração do lítio

| País | Market Share | | | | S ² | | | |
|--------|--------------|------|------|---------------|----------------|---------|---------|---------|
| | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 estimado | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
| China | 47% | 47% | 47% | 50% | 2193.84 | 2254.54 | 2239.87 | 2460.94 |
| Chile | 26% | 28% | 26% | 23% | 700.33 | 767.17 | 693.60 | 526.30 |
| Japão | 13% | 13% | 17% | 12% | 165.91 | 177.14 | 291.71 | 152.60 |
| Outros | 7% | 6% | 5% | 5% | 56.16 | 41.92 | 22.03 | 28.03 |

Tabela 13 Market Share e S² do processamento do lítio

| País | Market Share | | | | S ² | | | |
|-----------|--------------|------|------|---------------|----------------|---------|---------|---------|
| | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 estimado | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
| China | 64% | 65% | 65% | 64% | 4157.27 | 4210.13 | 4225.92 | 4128.75 |
| Chile | 27% | 27% | 29% | 25% | 703.35 | 744.75 | 858.67 | 619.69 |
| Argentina | 8% | 6% | 4% | 6% | 64.47 | 42.10 | 19.45 | 40.74 |
| Outros | 1% | 1% | 1% | 4% | 0.95 | 1.78 | 1.64 | 19.96 |

Tabela 14: Market Share e S² da extração do níquel

| País | Market Share | | | | S ² | | | |
|-----------|--------------|------|------|---------------|----------------|---------|---------|---------|
| | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 estimado | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
| Indonésia | 32% | 38% | 49% | 50% | 1029.34 | 1455.28 | 2437.89 | 2459.07 |
| Filipinas | 14% | 14% | 10% | 11% | 189.06 | 208.64 | 93.85 | 126.18 |
| Rússia | 10% | 7% | 6% | 6% | 91.84 | 55.97 | 35.25 | 39.71 |
| NC | 9% | 7% | 7% | 6% | 74.39 | 48.48 | 43.07 | 33.10 |
| Outros | 36% | 33% | 28% | 27% | 1293.00 | 1086.56 | 808.69 | 735.67 |

Tabela 15: Market Share e S² do processamento do níquel

| País | Market Share | | | | S ² | | | |
|-----------|--------------|------|------|---------------|----------------|---------|---------|---------|
| | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 estimado | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
| Indonésia | 25% | 33% | 43% | 50% | 634.88 | 1094.65 | 1886.90 | 2530.21 |
| China | 26% | 26% | 18% | 13% | 695.80 | 677.16 | 315.43 | 167.75 |
| Rússia | 6% | 3% | 5% | 5% | 34.88 | 6.77 | 22.39 | 20.41 |
| Canadá | 5% | 4% | 4% | 4% | 26.20 | 16.72 | 14.33 | 15.33 |
| Outros | 37% | 34% | 30% | 28% | 1398.88 | 1169.69 | 917.12 | 801.64 |

Tabela 16: Market Share e S² da extração do cobalto

| País | Market Share | | | | S ² | | | |
|-------|--------------|------|------|---------------|----------------|---------|---------|---------|
| | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 estimado | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
| Chile | 72% | 75% | 74% | 72% | 5116.22 | 5578.80 | 5402.25 | 5198.84 |
| Peru | 4% | 3% | 3% | 3% | 17.36 | 9.53 | 9.00 | 9.03 |
| DRC | 3% | 4% | 3% | 2% | 12.06 | 13.72 | 9.00 | 4.60 |
| China | 3% | 3% | 3% | 3% | 7.72 | 9.53 | 9.00 | 6.63 |
| Outro | 18% | 15% | 18% | 20% | 326.00 | 238.15 | 306.25 | 406.90 |

Tabela 17: Market Share e S² do processamento do cobalto

| País | Market Share | | | | S ² | | | |
|-----------|--------------|------|------|---------------|----------------|---------|---------|---------|
| | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 estimado | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
| China | 71% | 75% | 77% | 76% | 5102.04 | 5625.00 | 5902.74 | 5726.81 |
| Finlândia | 10% | 11% | 11% | 11% | 95.54 | 127.20 | 127.20 | 110.80 |
| Canadá | 5% | 4% | 5% | 7% | 20.35 | 14.13 | 27.70 | 45.79 |
| Outros | 14% | 14% | 12% | 17% | 204.08 | 183.16 | 144.72 | 273.62 |