



PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO

**O papel do Brasil na transição mundial para uma
economia de baixo carbono**
O cobre como matéria-prima estratégica

Marina Marques Dalla Costa

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CENTRO DE CIÊNCIAS SOCIAIS - CCS

DEPARTAMENTO DE ADMINISTRAÇÃO

Curso de Especialização em Políticas Públicas e Gestão Governamental nos
Setores Energético e Mineral

Brasília, maio de 2019.



Marina Marques Dalla Costa

**O papel do setor mineral brasileiro na transição global para
uma economia de baixo carbono**

O cobre como matéria-prima estratégica

Trabalho de Conclusão de Curso

Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização em Políticas Públicas e Gestão Governamental nos Setores Energético e Mineral, apresentada ao programa de pós-graduação lato sensu em Administração da PUC-Rio como requisito parcial para a obtenção do título de especialista em Políticas Públicas e Gestão Governamental nos Setores Energético e Mineral

Orientador: José Luiz Amarante Araújo

Brasília, maio de 2019.

Agradecimentos

Ao orientador, José Luiz Amarante, pelas contribuições, revisões e pelo direcionamento deste trabalho.

Aos colegas Osvaldo Barbosa Ferreira Filho e Mathias Heider, pelas discussões e contribuições diversas, bem como pelo incentivo.

À Agência Nacional de Mineração e ao Ministério de Minas e Energia, pela organização deste curso e autorização da minha participação.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Resumo

Marques Dalla Costa, Marina. Amarante Araújo, José Luiz. O papel do Brasil na transição mundial para uma economia de baixo carbono – O cobre como matéria-prima estratégica. Rio de Janeiro, 2019. 57 p. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Especialização em Políticas Públicas e Gestão Governamental nos Setores Energético e Mineral – Departamento de Administração. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A transição para uma economia de baixo carbono, decorrente dos esforços globais para cumprimento do Acordo de Paris, implica em um maior consumo de matérias primas minerais, em especial os bens minerais metálicos. Nesse contexto, países com potencial geológico para desenvolvimento da atividade de mineração, como é o caso do Brasil, têm a oportunidade de gerar desenvolvimento socioeconômico por meio da exploração racional de seus recursos minerais, aproveitando o ciclo positivo de demanda por *commodities* minerais. No Brasil, a existência de reservas e produção relevantes de várias dessas *commodities* coloca o setor mineral do país em posição de destaque, sendo necessária a construção de um arcabouço jurídico-institucional favorável ao desenvolvimento da atividade. Dentre os bens minerais metálicos produzidos no Brasil, o cobre vem apresentando desempenho positivo nos últimos anos, com perspectivas de ampliação da produção por meio de aumento da capacidade instalada de projetos em operação e desenvolvimento de novas áreas produtivas. Ressalta-se que esse metal é considerado estratégico para a transição a uma economia de baixo carbono, possuindo uma ampla gama de aplicações em tecnologias variadas.

Palavras-chave

economia de baixo carbono; matérias primas minerais; cobre; setor mineral brasileiro; economia mineral

Abstract

Marques Dalla Costa, Marina. Amarante Araújo, José Luiz. The role of Brazil's mining sector in the global transition to a low carbon economy - Copper as a key raw material. Rio de Janeiro, 2019. 57 p. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Especialização em Políticas Públicas e Gestão Governamental nos Setores Energético e Mineral – Departamento de Administração. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The transition to a low carbon economy, as a result of global efforts to comply with the Paris Agreement, implies a higher consumption of mineral raw materials, especially metals. In this context, countries with geological potential for mining activity, such as Brazil, have the opportunity to generate socioeconomic development through the rational exploitation of their mineral resources, taking advantage of the positive demand cycle for metallic commodities. In Brazil, the existence of relevant reserves and production of several of key metals places the country's mining sector in a prominent position, making it necessary to build legal and institutional frameworks favorable to the development of the activity. Among the metals produced in Brazil, copper registered a positive performance in recent years, with prospects of expanding production by increasing current installed capacity of operational projects as well as developing new productive areas. It is noteworthy that copper is considered a strategic metal for the transition to a low carbon economy, with a wide range of applications in various technologies.

Key-words

low carbon economy; mineral raw materials; copper; Brazilian mineral sector; mineral economy

Sumário

<u>1</u>	<u>INTRODUÇÃO E OBJETIVOS</u>	<u>9</u>
<u>2</u>	<u>A ATIVIDADE DE MINERAÇÃO</u>	<u>9</u>
<u>3</u>	<u>TECNOLOGIAS DE BAIXO CARBONO E A DEMANDA POR MATÉRIAS PRIMAS MINERAIS</u>	<u>15</u>
3.1	O ACORDO DE PARIS	15
3.2	CONSUMO DE MATÉRIAS PRIMAS MINERAIS NAS TECNOLOGIAS VERDES	19
<u>4</u>	<u>METODOLOGIA</u>	<u>25</u>
4.1	O RELATÓRIO ANUAL DE LAVRA (RAL)	26
<u>5</u>	<u>APRESENTAÇÃO DE DADOS E DISCUSSÕES</u>	<u>27</u>
5.1	PRODUÇÃO MINERAL BRASILEIRA	27
5.2	ÍNDICE HERSHMAN-HIRSHENFELD (HHI)	30
5.3	COBRE	35
5.4	PRODUÇÃO BRASILEIRA DE COBRE	44
<u>6</u>	<u>CONCLUSÕES</u>	<u>50</u>
<u>7</u>	<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>53</u>

Lista de figuras:

<i>Figura 1 - Elementos da tabela periódica utilizados em 1932 (A) e 2012 (B) e principais aplicações. Fonte de dados: US Bureau of Mines (dados de 1932) e United States Geological Service (dados de 2012).</i>	11
<i>Figura 2 - Etapas de um projeto de mineração, abarcando desde a exploração até o fechamento do empreendimento.</i>	12
<i>Figura 3 - Fluxo simplificado das etapas de um projeto de mineração em produção.</i>	14
<i>Figura 4 - Participação de cada tipo de fonte na geração de energia elétrica global em 2016. Fonte: Agência Internacional de Energia(IEA, 2018).</i>	17
<i>Figura 5 - Principais países investidores na geração de energia a partir de fontes renováveis em 2017. Fonte: Frankfurt School-UNEP Centre (2018).</i>	18
<i>Figura 6 – Investimentos realizados em 2017 em energia renováveis por tipo de fonte. Fonte: Frankfurt School-UNEP Centre (2018).</i>	18
<i>Figura 7 – Comparação entre os custos associados à geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis em 2010 e 2017. Dados são mostrados em dólares (US\$) por quilowatt/hora. Fonte: IRENA, 2018.</i>	19
<i>Figura 8 – mudanças na demanda de substâncias metálicas aplicadas na fabricação de tecnologias de geração de energia solar (A) e eólica (B) para cenários de aumento da temperatura global em 2°C e 4°C.</i>	23
<i>Figura 9 – Participação das principais substâncias metálicas no valor da produção mineral brasileira. As porcentagens indicadas ao lado das substâncias dizem respeito às participações de cada uma em relação ao valor total da produção brasileira de metálicos em 2017 (ANM, 2019).</i>	28
<i>Figura 10 – Comparação entre os Índices Hershman-Hirshenfeld (HHI) calculados para produção e reservas a partir dos dados do Serviço Geológico Americano para o ano-base 2017.</i>	32
<i>Figura 11 – Principais setores de uso final do cobre em 2015 (McKinsey Global Institute, 2016).</i>	36
<i>Figura 12 – Comparação dos materiais demandados para a fabricação de um veículo a combustão interna modelo Volkswagen Golf e um veículo elétrico modelo Chevrolet Bolt (Visual Capitalist, 2018b). Na imagem, copper = cobre, aluminium = alumínio, steel = aço, iron = ferro, rubber = borracha e other = outros.</i>	38
<i>Figura 13 – Projeções para o aumento da demanda por cobre até 2035 em milhões de toneladas (global primary copper demand) (McKinsey Global Institute, 2016). Na figura: historic = dados históricos e forecast = projeções. Em laranja é indicada a taxa de crescimento anual global composta (compound annual growth rate – CAGR).</i>	40
<i>Figura 14 – (A) Produção cumulativa de cobre para os quatro cenários analisados por Elshkaki et. al (2016) em relação às reservas consideradas. (B) produção cumulativa de cobre para os quatro cenários considerando que metade do cobre utilizado na condução e energia é substituído por um condutor não metálico. Nos dois casos, as linhas tracejadas indicam os anos nos quais a produção ultrapassa as estimativas de reservas e reservas de base utilizadas pelos autores. Nas figuras: Reserves = reservas;</i>	

<i>Reserves base = reservas de base; URR = últimos recursos recuperáveis (Ultimate Recoverable Resources); Remaining resources = recursos remanescentes.</i>	42
<i>Figura 15 – Localização das principais unidades produtoras de cobre no Brasil, de acordo com dados declarados no RAL ano-base 2017.</i>	44
<i>Figura 16 – Exportações de cobre por classe de produto (bens primários, semimanufaturados, manufaturados e compostos químicos) para o período 2012-2017. Fonte: ComexStat Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços.</i>	48
<i>Figura 17 – Produção beneficiada de cobre no período 2015 a 2018. Dados de concentrado e cobre contido em toneladas. Fonte: Relatório Anual de Lavra (RAL)</i>	47
<i>Figura 18 – Participação dos três estados brasileiros produtores de cobre no total da produção de concentrado registrada no período 2015 – 2018. Fonte: Relatório Anual de Lavra (RAL).</i>	47

1 Introdução e objetivos

Com a assinatura do Acordo de Paris, o mundo tem buscado alternativas tecnológicas com o objetivo de reduzir as emissões de gases do efeito estufa (GEE) em diversos setores da economia, notadamente no setor energético.

Tais tecnologias alternativas implicam em um maior consumo de matérias primas minerais, especialmente os bens minerais metálicos. Nesse contexto, estudos apontam para um aumento na demanda por substâncias minerais metálicas, tais como cobre, níquel, alumínio, ferro, manganês, lítio, cobalto e terras raras (Banco Mundial, 2017).

Esse cenário posiciona o setor mineral em um papel de destaque para contribuir e viabilizar a transição para um mundo sustentável (Fórum Mundial Econômico, 2014).

Dentre os bens minerais listados, o cobre destaca-se por possuir aplicação em uma ampla gama de tecnologias verdes, abarcando todo o sistema de geração, armazenamento, transmissão e distribuição de energia, bem como o setor de transportes, com destaque para suas aplicações na fabricação de carros elétricos.

Num cenário de aumento da demanda de matérias primas minerais, países detentores de recursos e reservas minerais podem se beneficiar de um ciclo positivo da indústria de mineração, gerando riquezas e desenvolvendo suas atividades a partir de práticas que visam minimizar os impactos ambientais associados.

Nesse contexto, com base no cenário apresentado, o presente trabalho tem por objetivo avaliar as vantagens comparativas do Brasil no fornecimento de bens minerais metálicos num cenário de crescimento da utilização de tecnologias de baixo carbono e avaliar o perfil e potencial de crescimento da indústria extrativa de cobre nacional.

2 A atividade de mineração

De acordo com o Banco Mundial¹, os recursos naturais têm importante papel político, econômico e social em 81 países, os quais, juntos, respondem por cerca de um quarto do PIB mundial e abarcam metade da população global. Dentre tais recursos, os bens minerais são particularmente importantes por servirem como insumo para praticamente todas as cadeias produtivas, sendo essenciais para a atividade econômica de um país, bem como para o desenvolvimento e bem-estar social do mundo moderno.

A demanda por recursos naturais minerais, em especial os metais, reside nos serviços obtidos a partir de produtos que contêm tais recursos, em setores como

¹ <http://www.worldbank.org/en/topic/extractiveindustries/overview>. Acessado em 28/11/2018.

transportes, energia elétrica, construção civil, medicina entre outros. A quantidade de recursos minerais em uso depende, portanto, no nível de utilização dos serviços e na eficiência com que são prestados (Gordon *et al.*, 2006).

A título de exemplo, para atingir, um nível de iluminação específico em uma casa, é necessária uma dada quantidade de cobre nos equipamentos utilizados na geração e nas linhas de transmissão de energia. Tal quantidade poderá aumentar, caso mais iluminação seja necessária, ou diminuir, caso haja o desenvolvimento de tecnologias que permitam que a mesma quantidade de energia seja gerada e transmitida a partir de uma quantidade menor de cobre. Além disso, deve-se considerar o ciclo de vida dos equipamentos de geração e transmissão, após o qual serão substituídos por novos aparelhos, o que implicará em mais demanda por cobre. Adicionalmente, o cobre contido nos equipamentos descartados poder ser ou reciclado ou aterrado e, nesse último caso, a diluição do metal em outros resíduos dificulta sua recuperação (Gordon *et al.*, 2006).

Historicamente, o desenvolvimento da humanidade foi balizado pela evolução das tecnologias de aproveitamento dos bens minerais (Curi, 2017), de sorte que a disponibilidade de recursos minerais em determinadas regiões favoreceu o desenvolvimento de civilizações, definiu os tipos de tecnologias desenvolvidas e fomentou disputas geopolíticas, com importantes implicações na cultura e nas sociedades de tais áreas do planeta.

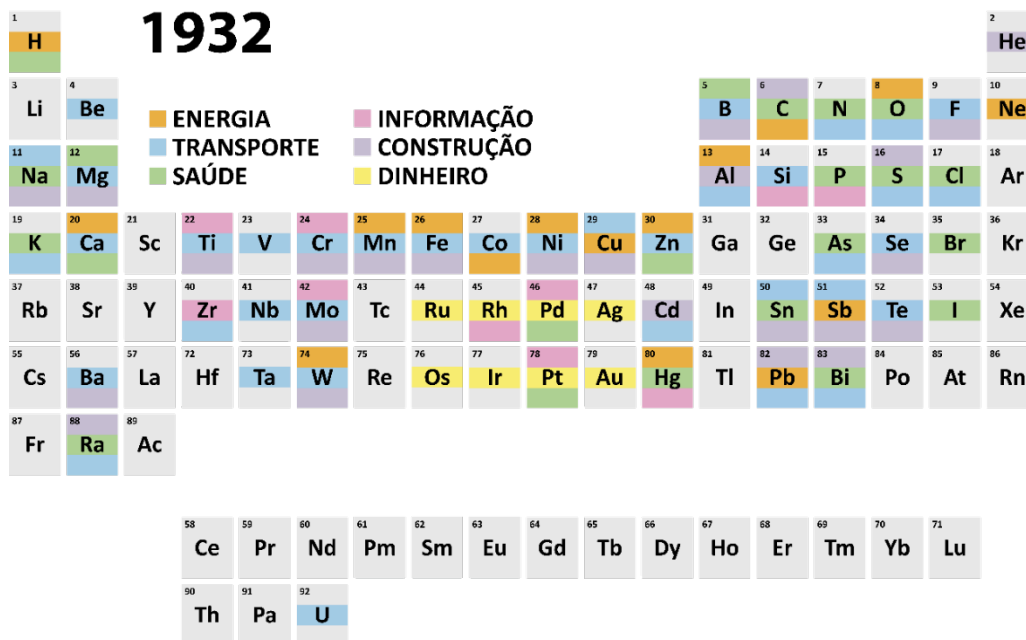
Atualmente, as matérias primas minerais são onipresentes na sociedade. Desde a metade do século passado, a intensidade e o número de materiais utilizados na fabricação de produtos diversos aumentaram consideravelmente, de forma que, hoje, virtualmente toda a tabela periódica de elementos possui aplicações nos diversos ramos de atividades econômicas (Nuss & Eckelman, 2014) (**Figura 1**). A título de exemplo, o número de elementos empregados na fabricação de circuitos integrados aumentou de doze, em 1980, para mais de sessenta atualmente (Greenfield & Graedel, 2013).

Dada a distribuição heterogênea dos recursos minerais na crosta terrestre, para a manutenção e desenvolvimento das tecnologias modernas, faz-se necessário um intenso e diversificado comércio de tais bens, especialmente dos recursos minerais metálicos. Nesse contexto, assegurar o acesso a tais materiais é uma preocupação para os governos de vários países² bem como para a academia, com o desenvolvimento de diversos estudos sobre segurança ao acesso e criticidade de matérias primas minerais (ex.: Graedel *et. al*, 2012; Achzet & Helbig, 2013; Rosenau-Tornow *et al*, 2009; Morley

² Ex.: European Commission (2010) European commission critical raw materials for the EU; US Department of Energy (2010) Critical Materials Strategy.

& Eatherley, 2008; Buchert *et al.*, 2009; Borwn, 2002; Roelick *et al.*, 2014; Erdmann & Graedel, 2011; Alonso *et al.*, 2012).

A



B



Figura 1 - Elementos da tabela periódica utilizados em 1932 (A) e 2012 (B) e principais aplicações. Fonte de dados: *US Bureau of Mines* (dados de 1932) e *United States Geological Service* (dados de 2012).

Nesse contexto, países com características geológicas favoráveis à atividade de mineração, como é o caso do Brasil, têm uma oportunidade única de desenvolvimento econômico e social a partir do aproveitamento racional e sustentável de seus recursos minerais. Por meio de uma gestão transparente e com boa governança, bem como do respeito pelo meio ambiente e pelas necessidades das comunidades afetadas, os lucros gerados pela indústria extrativa mineral podem ter um impacto positivo na redução da pobreza e promoção do desenvolvimento e prosperidade de todos.

De acordo com a legislação brasileira, a atividade de mineração abrange a pesquisa, a lavra, o desenvolvimento da mina, o beneficiamento, a comercialização dos minérios, o aproveitamento de rejeitos e estéreis e o fechamento da mina, incluindo a recuperação ambiental da área (Decreto nº 9.406/2018) (**Figura 2**).

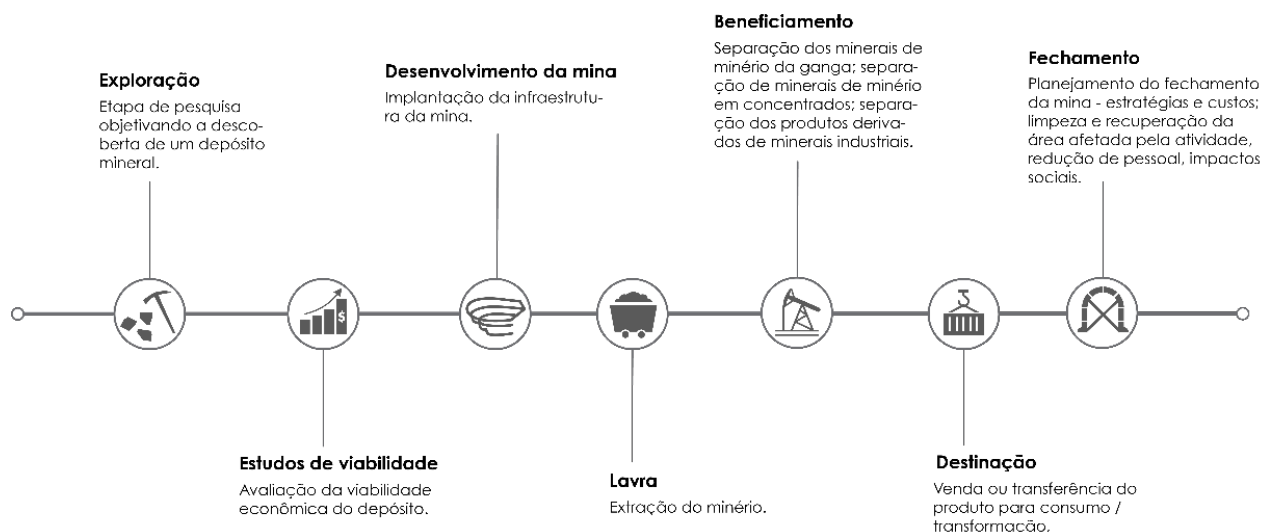


Figura 2 - Etapas de um projeto de mineração, abrangendo desde a exploração até o fechamento do empreendimento.

A lógica por trás da viabilização de um projeto de mineração parte da identificação de concentrações anômalas de determinado elemento ou recurso mineral na crosta terrestre e, a partir da avaliação de uma série de condições de contorno, possibilitar a exploração econômica da anomalia. Dentre as condições de contorno que devem ser atendidas para que determinado projeto de mineração possa ser viável, destacam-se:

- Infraestrutura para produção e vias de escoamento;
- Investimento / aspectos financeiros do projeto e custo de capital;
- Segurança técnica, abrangendo desde os trabalhos de pesquisa até o tratamento do minério, incluindo aspectos ambientais;

- Segurança institucional;
- Regulação eficaz;
- Apoio social;
- Mercado; e
- Garantia de qualidade do produto.

Além disso, algumas especificidades da indústria extrativa mineral, que a diferenciam de outros setores produtivos, devem ser levadas em conta, dentre as quais destacam-se:

(i) **Rigidez locacional e distribuição heterogênea dos recursos minerais** – A atividade de mineração, ao contrário de outros tipos de indústria, só pode desenvolver-se em locais nos quais ocorrem concentrações econômicas de determinado recurso mineral, as quais têm distribuição heterogênea na crosta terrestre.

(ii) **Caráter finito dos recursos minerais** – Os recursos minerais são bens não renováveis e finitos de forma que, uma vez que determinada jazida é exaurida, a atividade cessa. Dessa forma, a arrecadação de *royalties* e taxas, bem como a geração de empregos e consequente impacto na economia local estão restritos à vida útil de determinada jazida.

Para que os benefícios da mineração sejam perenes, os recursos por ela originados devem ser aplicados de forma a permitir que as comunidades impactadas por projetos de mineração não sejam dependentes exclusivamente dessa atividade. Nesse sentido, a gestão adequada de tais recursos, nas esferas local, regional e nacional, associada a ações de planejamento de médio a longo prazo são necessárias. A responsabilidade de gestão dos ganhos oriundos da extração de recursos finitos por parte do poder público é, portanto, maior do que daqueles oriundos de outras atividades econômicas.

(iii) **Atividade de risco intensiva em capital e com longo prazo para maturação dos investimentos** – Um projeto de mineração é intensivo em capital e caracterizado por altos riscos iniciais, que vão sendo reduzidos ao longo das etapas de pesquisa mineral e avaliação de viabilidade econômica. Adicionalmente, entre o início da fase de pesquisa e a entrada em produção de um projeto, podem decorrer mais de dez anos, o que faz com que seja necessário criar um ambiente seguro para captação de investimentos para tais projetos, com regras claras e seguindo as boas práticas aceitas internacionalmente.

Dessa forma, ao traçar suas estratégias para o setor mineral, um país deve levar em conta a dinâmica e as especificidades da atividade, tendo claro quais são os objetivos esperados pelo país com a exploração de seus recursos minerais finitos.

A atração de investimentos para o setor, em especial para projetos de exploração mineral, é essencial para a renovação dos estoques de reservas e manutenção do país como um *player* relevante no cenário mundial. Para que um país possa atrair investimentos privados, internos e externos, para o desenvolvimento de projetos de mineração, as instituições e órgãos governamentais devem promover um ambiente seguro, com regras setoriais claras, justas, competitivas e previsíveis, sem abrir mão do respeito ao meio ambiente, comunidades locais e à participação do país nos lucros da atividade de mineração.

A partir de uma reserva definida após a conclusão da etapa de pesquisa mineral e dos estudos de viabilidade, as principais atividades de um projeto de mineração consistem na **lavra**, a qual abarca o decapeamento do estéril, o desmonte do minério bruto, ou *run of mine* (R.O.M.) e seu transporte às unidades de tratamento, se for o caso; **beneficiamento**, que corresponde ao conjunto de operações, como cominuição e concentração, que visam a preparar os bens minerais para consumo na indústria, sem modificar a identidade química ou física dos minerais; e **destinação**, etapa na qual os produtos são ou comercializados ou consumidos pelo mesmo grupo empresarial em seus processos produtivos (**Figura 3**).

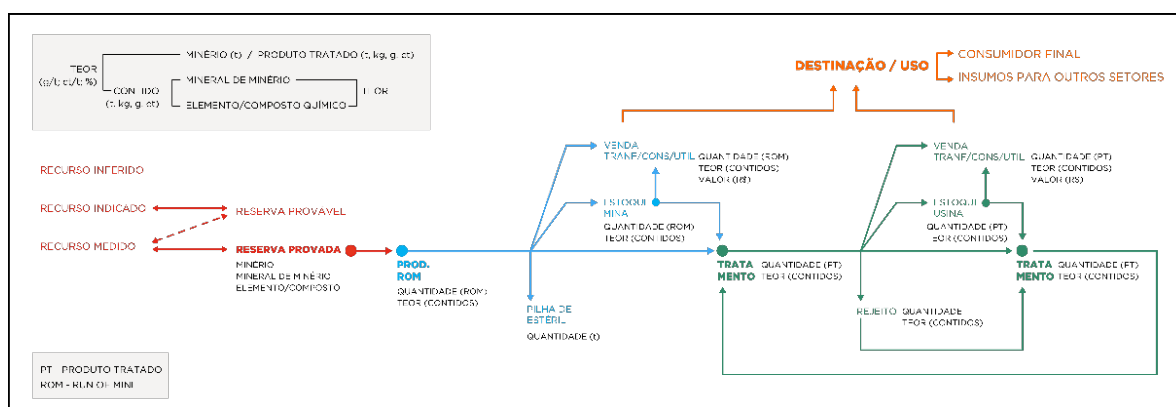


Figura 3 - Fluxo simplificado das etapas de um projeto de mineração em produção.

Após as etapas de beneficiamento e destinação da produção, no caso dos bens minerais metálicos, a obtenção do elemento metálico é feita, tipicamente, a partir das etapas de separação, ou *smelting*, e refino, por meio de uma variedade de rotas de processamento. Em cada estágio, impurezas e subprodutos são separados e a

concentração do metal no produto final aumenta progressivamente (Nuss & Eckelman, 2014).

De forma análoga a outros setores da economia, a dinâmica do setor mineral é regida, de forma geral, por variações na oferta e na demanda por determinado recurso mineral.

Em relação aos fatores que controlam a **oferta** de recursos minerais, destacam-se (i) a disponibilidade de recursos e reservas; (ii) a produção primária (bruta e beneficiada); (iii) a dinâmica das cadeias produtivas; (iv) reciclagem, incluindo taxas atuais e potencial futuro; e (v) recursos não convencionais, como aproveitamento de rejeitos (Tokimatsu *et al.*, 2017).

Dentre os fatores que influenciam a **demand**a, ressaltam-se (i) a intensidade de utilização das matérias primas minerais em determinada aplicação ou economia e suas variações; (ii) substituição por tecnologias ou materiais alternativos; e (iii) competição entre setores e aplicações (Tokimatsu *et al.*, 2017).

Dessa forma, a urbanização e obras de infraestrutura impulsionadas pelo crescimento econômico de países em desenvolvimento, a disseminação do uso de eletrônicos na sociedade moderna e a transição tecnológica na geração de energia ,priorizando aquelas com baixa emissão de carbono, que, por sua vez, são mais intensivas em matérias primas minerais, têm papel importante no aumento da demanda por recursos minerais (Nuss & Eckelman, 2014; de Koning *et al.*, 2018).

3 Tecnologias de baixo carbono e a demanda por matérias primas minerais

3.1 O Acordo de Paris

Em 2015, na 21ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP 21), 195 países assinaram o chamado Acordo de Paris, com o objetivo de frear o aquecimento global, mantendo a temperatura média do planeta abaixo de 2°C em relação aos níveis pré-industriais, e envidando esforços para que o aumento de temperatura não ultrapasse 1,5°C.

O acordo entrou em vigor em novembro de 2016, quando foram atendidas as condições para tanto: ratificação por mais de 55 países que, juntos, respondem por 55% das emissões globais de gases do efeito estufa (GEE).

Cada país signatário apresentou, voluntariamente, metas de redução de emissões de GEE, as chamadas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC –

Nationally Determined Contributions); entretanto, estudos apontam que apenas tais metas são insuficientes para alcançar os objetivos propostos pelo acordo³, além disso, muitos países ainda encontram dificuldades para o planejamento e adoção de políticas voltadas a ações que permitam o cumprimento das metas.

Nesse contexto, medidas mais efetivas são necessárias para atingir as metas pactuadas, tais como zerar as emissões acumuladas de GEE ao longo deste século, por meio de ações como, por exemplo, a adoção em larga escala de energias renováveis, captura de carbono (CCS – *carbono capture and storage*) e geração de energia a base de hidrogênio nos setores industrial, de transporte e residencial (Tokimatsu et al., 2018).

Atualmente, quase 70% da eletricidade produzida no mundo tem por fonte combustíveis fósseis, principalmente carvão (41%) e gás natural (21%), e a geração de energia responde por mais de 40% das emissões globais de CO₂. Comparado a outros setores, a redução de emissões de GEE na geração de energia elétrica é relativamente simples, uma vez que consiste, principalmente, na troca da fonte e estrutura de geração, com poucas ou nenhuma adaptação nas infraestruturas dos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica (Kleijn et al., 2011).

Além disso, a demanda por eletricidade tem aumentado de forma constante desde o final do século XIX. A adoção cada vez maior de tecnologias como carros elétricos e bombas de calor podem acelerar tal crescimento (Kleijn et al., 2011). Dessa forma, considera-se o setor elétrico uma área estratégica para a redução das emissões globais de GEE e, conseqüentemente, o sucesso do Acordo de Paris.

Dentre as tecnologias reconhecidas como essenciais para possibilitar um futuro com baixa ou nenhuma emissão de GEE no setor energético, destacam-se as tecnologias de geração de energia eólica e solar e as de armazenamento de energia (Banco Mundial, 2017).

De acordo com a Agência Internacional de Energia, em 2016, as energias renováveis responderam por cerca de 25% da geração de energia elétrica global (Figura 4). Ainda de acordo com a agência, para atender às metas do Acordo de Paris e reduzir o risco de mudanças climáticas drásticas, o setor global de energia deverá se transformar, com uma participação considerável das fontes renováveis. Nesse cenário, a energia gerada a partir de painéis fotovoltaicos deverá aumentar em 17 vezes de 2015 para 2050 (IEA, 2018).

Nesse contexto, observou-se, nos últimos anos, um aumento considerável na participação de fontes não renováveis na matriz energética global, com importantes

³ <https://climateactiontracker.org/>. Acessado em: 28/02/2019.

economias como China e União Europeia envidando esforços para realizar uma transição em suas matrizes energéticas para fontes renováveis (Figura 5).

Estimativas das Nações Unidas e da Bloomberg New Energy Finance indicam que, em 2017, foram gastos 279,8 bilhões de dólares em investimentos na geração de energia a partir de fontes renováveis, contra apenas 132 bilhões de dólares gastos com geração de energia a partir de fontes fósseis. Nesse mesmo ano, registrou-se um aumento recorde na capacidade comissionada de energia elétrica a partir de fontes renováveis, atingindo 157 giga watts (Frankfurt School-UNEP Centre, 2018).

Dentre as fontes de energias renováveis que mais tiveram investimentos em 2017, destacam-se a solar e a eólica (**Figura 6**), alavancadas, em parte, pelos avanços tecnológicos que facilitaram a produção e pela queda nos custos associados à geração de energia a partir de tais tecnologias. A título de exemplo, o custo médio da energia elétrica gerada a partir de painéis solares fotovoltaicos caiu de 0,36 dólares (US\$) por quilowatt/hora em 2010 para 0,1 US\$ por quilowatt/hora em 2017, tornando-se competitiva com a energia gerada a partir de combustíveis fósseis (Figura 7) (IRENA, 2018).

No caso da energia eólica, o aumento do tamanho das turbinas combinado com economias de escala reduziram o preço desse tipo de energia, a ponto de se tornar competitiva com sistemas de geração a partir de combustíveis fósseis em vários países como Itália, Espanha, Reino Unido e China e, no caso do Brasil, chegando a ultrapassar a paridade (Channell *et al.*, 2013; Banco Mundial, 2017).

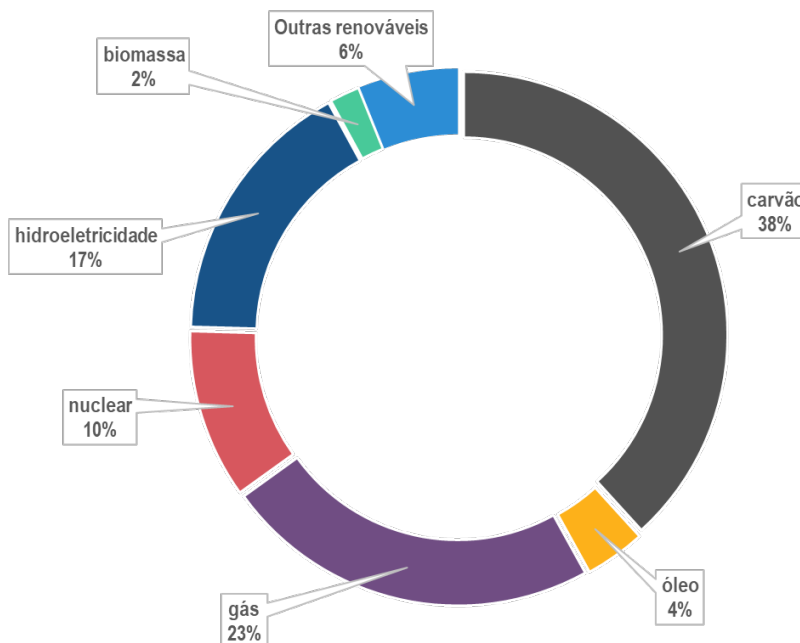
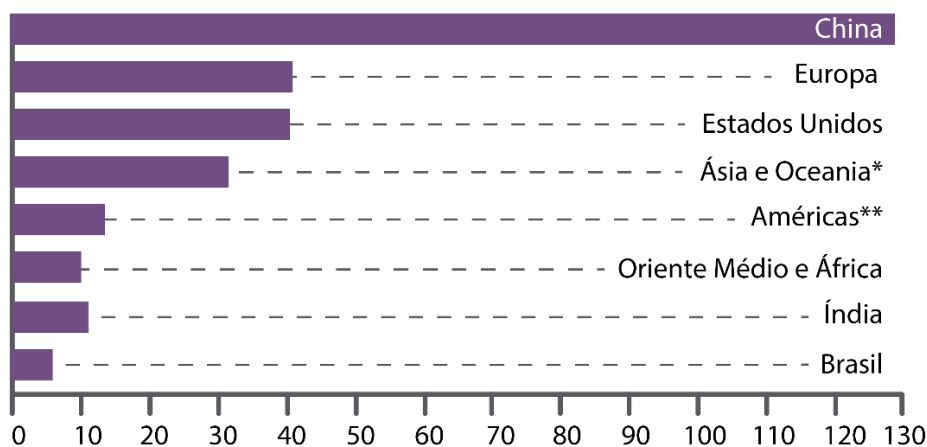


Figura 4 - Participação de cada tipo de fonte na geração de energia elétrica global em 2016. Fonte: Agência Internacional de Energia (IEA, 2018).

Principais países investidores em energia renovável - 2017
valores e bilhões de US\$



*Excluindo China e Índia **Excluindo Brasil e Estados Unidos

Figura 5 - Principais países investidores na geração de energia a partir de fontes renováveis em 2017. Fonte: Frankfurt School-UNEP Centre (2018).

Investimentos em energias renováveis por tipo de fonte - 2017
valores e bilhões de US\$

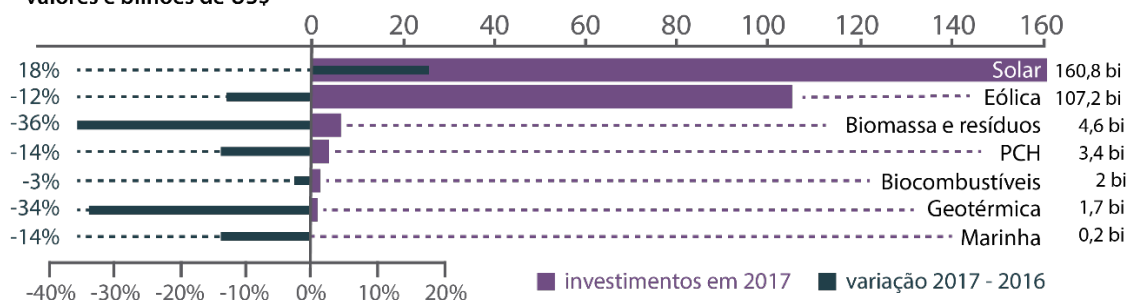


Figura 6 – Investimentos realizados em 2017 em energia renováveis por tipo de fonte. Fonte: Frankfurt School-UNEP Centre (2018).

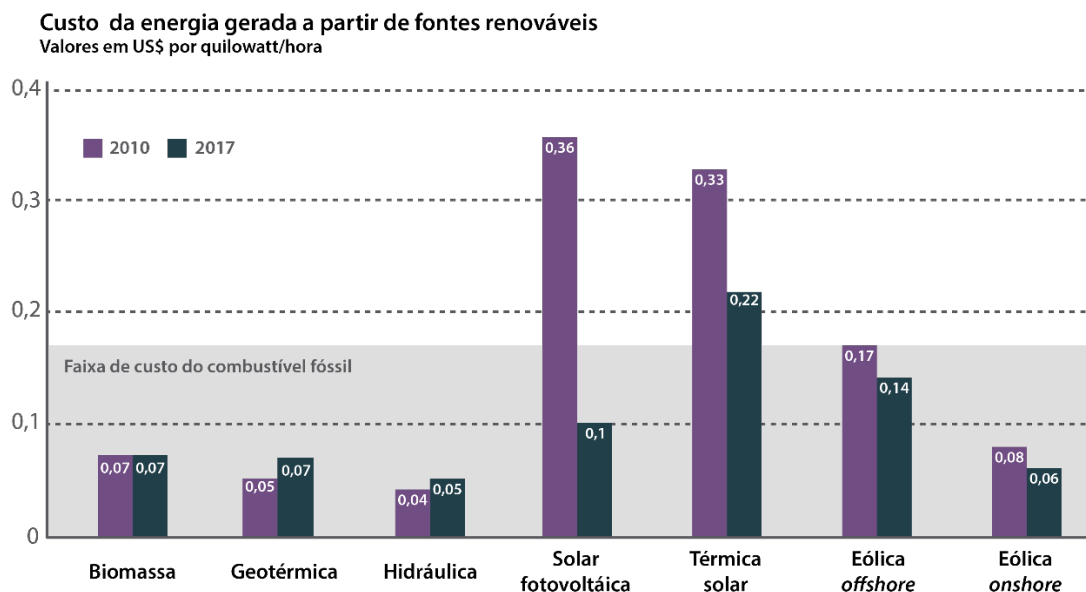


Figura 7 – Comparação entre os custos associados à geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis em 2010 e 2017. Dados são mostrados em dólares (US\$) por quilowatt/hora. Fonte: IRENA, 2018.

3.2 Consumo de matérias primas minerais nas tecnologias verdes

Com a assinatura do Acordo de Paris, diversas análises foram realizadas abordando aspectos técnicos e a viabilidade das medidas de redução de emissões e mitigação de impactos propostas; entretanto, foi realizado um número menor de análises focando nas implicações de tais medidas no consumo de materiais (Banco Mundial, 2017).

Tradicionalmente, a indústria extrativa mineral tem sido apontada como um setor de alto impacto ambiental, principalmente após os desastres com barragens de mineração em Carbo, no Canadá, e Mariana e Brumadinho, em Minas Gerais; entretanto, não há como se falar em tecnologias de baixo carbono e um futuro com zero emissões de GEE sem considerar as implicações no consumo de matérias primas minerais, em especial, de bens minerais metálicos.

Sistemas de geração de energia de baixo carbono a partir de fontes renováveis são consideravelmente mais intensivos em metais do que os sistemas tradicionais (Alonso *et al.*, 2012). A transição para uma economia de baixo carbono irá requerer uma quantidade considerável de minerais metálicos e não metálicos, de forma que a mineração e as mudanças climáticas estão intimamente ligadas, não apenas porque a atividade de mineração requer uma quantidade considerável de energia mas, também, porque não será possível evitar as mudanças climáticas sem o suprimento adequado

de minerais para a manufatura de sistemas de geração de energias limpas (Ali *et al.*, 2017).

Nesse contexto, minerais não metálicos e, em especial, metálicos, terão um papel de destaque na transição para um futuro de baixo carbono, com mudanças potenciais nos mercados de bens minerais (Banco Mundial, 2017).

Deve-se ressaltar que é impossível realizar uma previsão exata do aumento da oferta e demanda num futuro de crescimento de tecnologias de baixo carbono, devido às várias incertezas associadas, bem como indicar com precisão quais matérias primas minerais serão mais demandadas (Banco Mundial, 2017; de Koning *et al.*, 2018; Fórum Econômico Mundial, 2014). Dentre tais fatores, ressaltamos: (i) até que ponto a comunidade global irá perseguir e conseguir atender às metas do Acordo de Paris; (ii) quais tipos de fontes de energia de baixo carbono serão adotadas e, dentro de um mesmo tipo de fonte, quais tecnologias serão priorizadas (Banco Mundial, 2017; Tokimatsu *et al.*, 2017). Dessa forma, utilizando as tecnologias de geração de energia eólica como exemplo, a demanda futura é uma função tanto da quantidade de turbinas que serão empregadas quanto do tipo de turbina empregado (*direct drive* ou *geared*) (Banco Mundial, 2017).

Portanto, é importante que o setor mineral esteja preparado não apenas para atender ao aumento da demanda geral por metais num cenário de redução de emissões de GEE mas, também, para ter flexibilidade no atendimento a variações de demanda para cada metal, conforme as escolhas por tecnologias específicas forem feitas (Banco Mundial, 2017).

Com base nesse contexto, dependendo do tipo de modelagem utilizada e nos cenários avaliados, estudos de projeção de demanda de matérias primas minerais em um futuro de baixo carbono apresentam diferentes resultados; entretanto, quase toda a literatura que aborda o assunto converge para um aumento geral da demanda por metais em relação ao cenário atual (ex.: Takimatsu *et al.*, 2017, 2018; Banco Mundial, 2017, de Koning *et al.* 2018; Burchet *et al.*, 2009; Elshaki *et al.*, 2016).

Um estudo do Banco Mundial (2017) avalia três diferentes cenários para aumento na demanda de matérias primas metálicas, com base em três grupos de tecnologias: eólica, solar e armazenamento de energia. Em cada cenário, é considerada a demanda necessária de alumínio, cobre, minério de ferro, níquel, manganês, cádmio, chumbo, zinco, titânio, cromo, cobalto, prata, metais do grupo da platina, silício, lítio, molibdênio e terras raras para manter o aquecimento global em 2°C, 4°C e 6°C respectivamente. Na **Tabela 1**, são listadas as substâncias metálicas utilizadas em cada grupo de tecnologias de baixo carbono, conforme levantamento realizado pelo Banco Mundial (2017).

O trabalho também indica que, entre os cenários de 4°C e 2°C, o grau de adoção de tecnologias de baixo carbono necessário e, conseqüentemente, a demanda por matérias primas metálicas utilizadas em tais tecnologias, aumenta consideravelmente (**Figura 8**). O principal exemplo ocorre para os elementos utilizados na fabricação de tecnologias de armazenamento de energia, cujo aumento na demanda para metais como alumínio, cobalto, ferro, chumbo, lítio, manganês e níquel é de mais de 1.000% no cenário de 2°C (Banco Mundial, 2017).

Dessa forma, a aceleração no desenvolvimento e adoção de tecnologias para geração de energia eólica e solar, bem como as de armazenamento de energia terá implicações consideráveis no mercado de *commodities* minerais, e não apenas naquelas menos usuais, como os elementos terras raras, mas, também, em substâncias como alumínio, cobre, ferro, chumbo e outros.

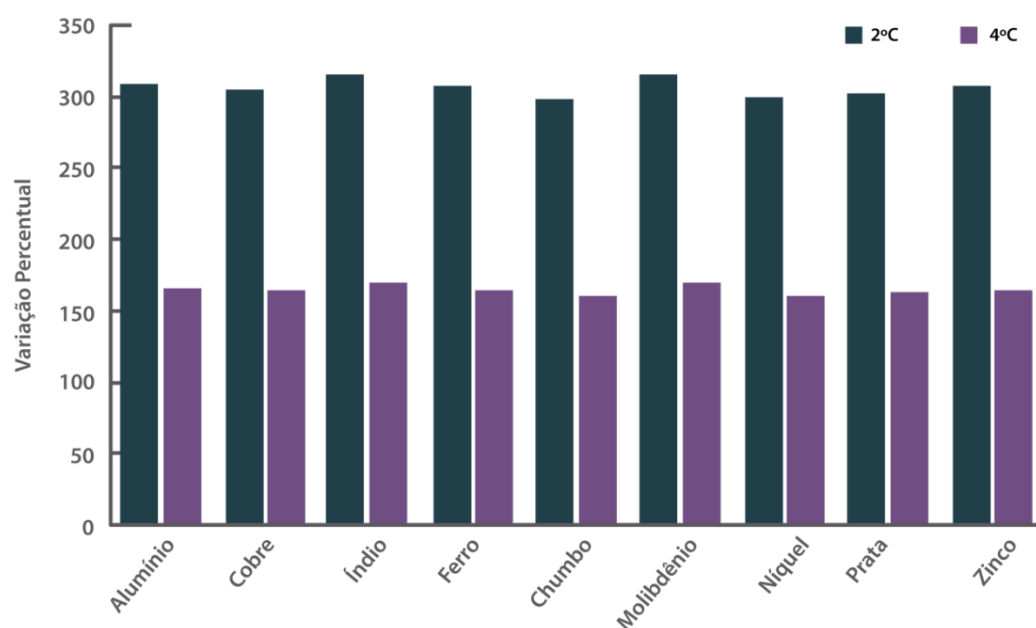
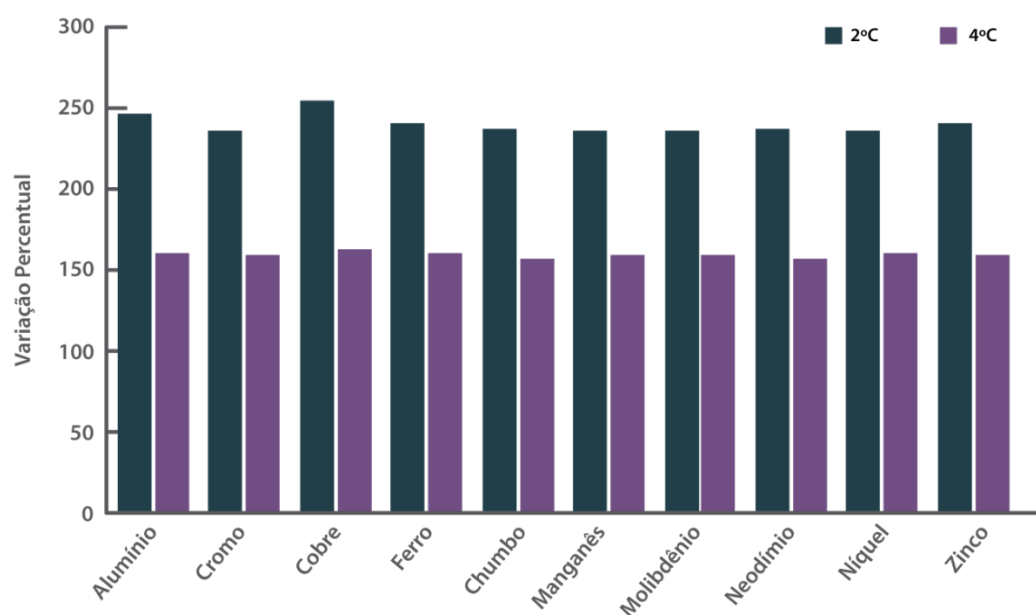
A**B**

Figura 8 – mudanças na demanda de substâncias metálicas aplicadas na fabricação de tecnologias de geração de energia solar (A) e eólica (B) para cenários de aumento da temperatura global em 2°C e 4°C.

Tokimatsu *et al.* (2017, 2018) utilizam abordagens holísticas do tipo *nexus* para modelar demandas futuras de metais necessários para tecnologias de baixo carbono. Tal abordagem implica numa análise não apenas das relações com os recursos minerais demandados por cada tipo de tecnologia, mas, também, das relações e interações complexas entre o meio físico e a sociedade.

Em ambos os trabalhos, os autores concluem que a demanda por metais em 2100 aumenta em relação aos níveis atuais, especialmente em cenários de maior utilização de energias renováveis, com destaque para a energia solar a partir de painéis fotovoltaicos.

Tokimatsu *et al.* (2018) chamam atenção para o caso do vanádio, índio, níquel e lítio, cujas produções acumuladas para o período 2015 – 2100 ultrapassam os dados de recursos considerados pelos autores, colocando esses elementos em risco de criticidade da oferta.

Na **Tabela 2**, são listados os metais considerados por Tokimatsu *et al.* (2018), com as respectivas aplicações em tecnologias de baixo carbono.

Tabela 2 – aplicações de matérias primas metálicas em tecnologias de baixo carbono, (Tokimatsu *et al.* 2018).

Tecnologia	Metal
c-Si PV	Si, Ag
CIGS PV	In, Ga, Se
CdTe PV	Cd, Te
Eólico	Cu, Fe, Nd, Dy
EV	Li, Cu, Ni, Mn
PHEV	Li, Co, Ni, Mn
Nuclear	Hf, In, Ag, Mo, Cu
Geotermal	Cu
Hidroeletricidade	Cu
Hidrogênio	Cu
Biomassa	Cu
CCS	V, Ni, Nb
Transmissão e distribuição	Cu
Produção de H2 para FCV	Zr, Pd, Cu, Ag, Al
célula FCV	Ni, Zr, Pt, Y
Tanque FCV	Ni, Zr, Pt, V, Ti, Al, Li, La, Mg, Cu, Cr, B, W

Notas:

PV – painel fotovoltaico;

EV – veículo elétrico;

PHEV – veículo elétrico híbrido;

CCS – captura e armazenamento de carbono;

FCV – veículo elétrico de célula a combustão.

4 Metodologia

As análises deste trabalho foram desenvolvidas em dois eixos principais, quais sejam: (i) análise geral do nível de concentração da produção e das reservas de substâncias minerais metálicas indicadas no item 3.2 com produção ou reservas conhecidas no Brasil e (ii) Avaliação da situação atual da aplicação do cobre em tecnologias de baixo carbono e da produção de cobre no país, juntamente com as perspectivas futuras.

Dessa forma, em relação ao primeiro eixo, com o objetivo de avaliar o potencial do Brasil em atender à demanda crescente por matérias primas minerais necessárias às chamadas tecnologias de baixo carbono, e a partir do levantamento bibliográfico realizado no item anterior, as seguintes substâncias minerais metálicas foram selecionadas para avaliação:

- Alumínio (bauxita);
- Manganês;
- Minério de ferro
- Cobre;
- Chumbo;
- Cromo;
- Nióbio;
- Níquel;
- Zinco;
- Terras raras;
- Lítio; e
- Vanádio.

Tal seleção contemplou, portanto, os bens minerais com produção e / ou reservas relevantes no Brasil.

Para cada um dos bens minerais acima listados, foi calculado, tanto para dados de produção quanto de reservas, o Índice Hershman-Hirshenfeld (HHI), utilizado para medir o nível de concentração de determinado mercado (United States Department of Justice, 2006), utilizando dados de produção do *World Mining Data 2018*, elaborado pelo Ministério de Sustentabilidade e Turismo da Áustria (Federal Ministry of Sustainability and Tourism of Austria, 2018) e do Serviço Geológico Americano – USGS (2017, 208).

O índice HHI é calculado por meio da equação 01, na qual f é a participação percentual do país i na reserva ou produção do bem mineral j .

$$HHI_j = \sum_i (f_{i,jj})^2 \quad (\text{Equação 01})$$

O Índice Hershman-Hirshenfeld aumentará tanto quando o número de países detentores de reservas / produção diminui quanto quando a disparidade entre as participações percentuais dos países aumenta.

Dessa forma, se a totalidade das reservas ou produção de determinado bem mineral é concentrada em um único país, $HHI = 100^2 = 10.000$, que corresponde, portanto, ao valor máximo que pode ser obtido para o índice. Da mesma forma, caso as reservas ou produção estejam divididas em quatro países nas porcentagens de 40, 30, 15, 15, $HHI = 40^2 + 30^2 + 15^2 + 15^2 = 2.950$. Em casos em que um grande número de países detém as reservas / produção de determinado bem mineral, o Índice Hershman-Hirshenfeld se aproximará de zero.

Em geral, considera-se que um mercado com HHI entre 1.500 e 2.500 pontos é moderadamente concentrado e, mercados com HHI acima de 2.500 são ditos altamente concentrados.

Para as análises relacionadas ao segundo eixo, foi feita uma avaliação do panorama da produção de cobre no Brasil para o período de 2015 a 2018, com base nos dados declarados nos Relatórios Anuais de Lavra (RAL) pelos titulares de direitos minerários com autorização para produção de cobre, sendo analisados dados de:

- Projetos existentes e suas características;
- Capacidade instalada;
- Séries históricas e características da produção; e
- Novos projetos / perspectivas futuras.

4.1 O Relatório Anual de Lavra (RAL)

A declaração do Relatório Anual de Lavra é prevista no artigo 47 do Código de Mineração como Relatório Anual de Atividades, e consiste em uma das obrigações legais dos detentores de títulos autorizativos de lavra. Sua apresentação à ANM deve ser realizada até o dia 15 de março de cada ano, relatando as atividades realizadas no ano anterior. Desde o ano-base de 2010, a declaração do RAL é feita por meio de plataforma web, disponível para acesso no endereço <https://ralweb.dnrm.gov.br/>.

Dentre as informações contempladas na declaração do RAL, destacam-se:

- Dados básicos das minas – informações técnicas sobre método de lavra, grau e mecanização, número de frentes de lavra, vida útil da mina, relação estéril/minério entre outros;
- Dados básicos das usinas – informações técnicas sobre as operações de beneficiamento e grau de recuperação entre outros;
- Dados de reservas minerais, conforme definições previstas no Regulamento do Código de Mineração de 1968, (Decreto nº 62.934/1968), o qual foi revogado pelo Decreto nº 9.406/2018;
- Movimentação da produção bruta;
- Características da produção bruta e projeções;
- Dados de tratamento e transferência, bem como alimentação das usinas de beneficiamento;
- Movimentação da produção beneficiadas;
- Características da produção beneficiada e projeções; e
- Dados de destinação da produção – comercialização, consumo, utilização, transferência para transformação e mercado consumidor.

5 Apresentação de dados e discussões

5.1 Produção Mineral Brasileira

De acordo com o Anuário Mineral Brasileiro 2018 – principais substâncias metálicas, o valor da produção mineral brasileira, em 2017, foi de 110,6 bilhões de reais, com as substâncias metálicas perfazendo cerca de 80% desse total. Dentre tais substâncias, destacam-se o minério de ferro, cobre, ouro, alumínio, níquel, manganês, estanho, nióbio, zinco, cromo e vanádio (**Figura 9**) (ANM, 2019).

A partir de dados do Relatório Anual de Lavra ano-base 2017, a classificação completa das substâncias metálicas foi detalhada, e o resultado é indicado na **Tabela 3**. É possível observar que várias das substâncias listadas nas **Tabela 1 e Tabela 2** do item 3.2 tiveram registro de produção no Brasil em 2017.

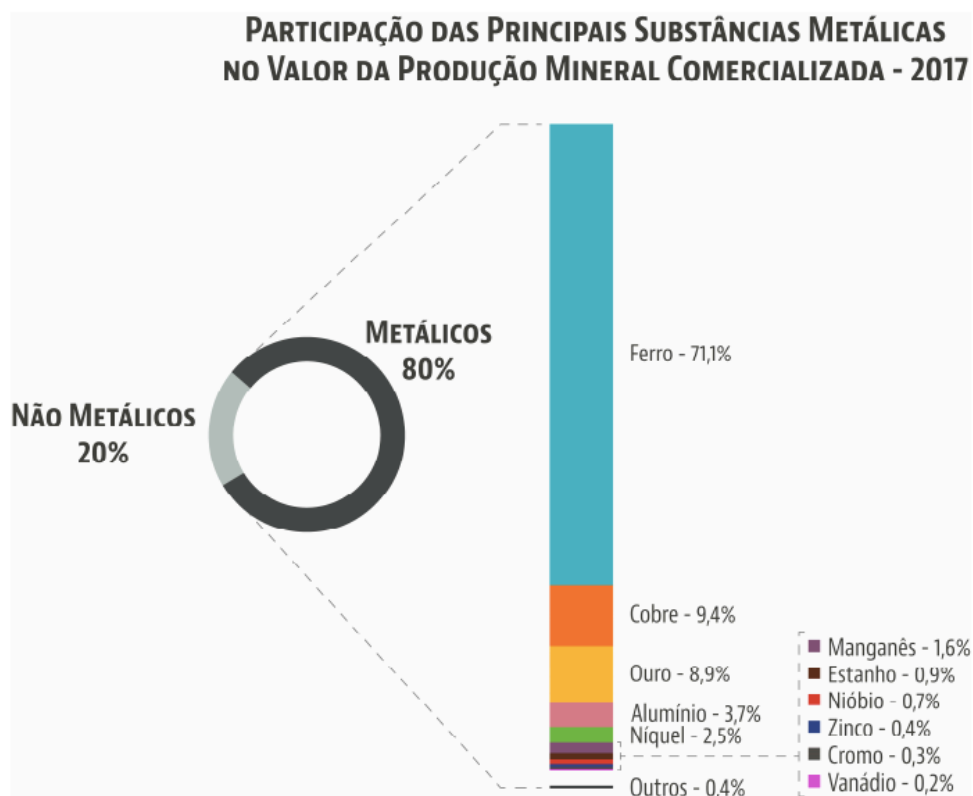


Figura 9 – Participação das principais substâncias metálicas no valor da produção mineral brasileira. As porcentagens indicadas ao lado das substâncias dizem respeito às participações de cada uma em relação ao valor total da produção brasileira de metálicos em 2017 (ANM, 2019).

Tabela 3 – Valor da produção das substâncias metálicas em 2017 e acordo com dados do Relatório Anual de Lavra (RAL).

Substância	Valor Produção (R\$)	Participação no total dos metálicos
Ferro	63.181.792.031	71,1%
Cobre	8.368.906.676	9,4%
Ouro	7.884.737.729	8,9%
Alumínio (Bauxita)	3.259.527.535	3,7%
Níquel	2.181.617.332	2,5%
Manganês	1.408.871.048	1,6%
Estanho	817.426.974	0,9%
Nióbio	635.629.056	0,7%
Zinco	378.604.177	0,4%
Cromo	254.441.782	0,3%

Substância	Valor Produção (R\$)	Participação no total dos metálicos
Vanádio	91.686.377	0,1%
Zircônio	87.457.891	0,1%
Tântalo	84.769.679	0,1%
Chumbo	82.679.481	0,09%
Titânio	66.851.522	0,08%
Tungstênio	21.090.147	0,02%
Lítio	11.192.274	0,01%
Prata	6.257.460	0,01%
Monazita e ETR ¹	2.677.023	0,003%
Cobalto	234.177	0,0003%
Berílio	13.465	0,00002%
TOTAL	88.826.463.837	

¹ETR – Elementos Terras Raras.

A partir desses dados, e com base na revisão bibliográfica realizada no item 3.2, foram selecionadas matérias primas minerais com (1) previsão de aumento de demanda, com base em sua aplicação em tecnologias de baixo carbono e (2) com potencial de oportunidade para o Brasil, por haver produção e / ou reservas do referido bem mineral em território nacional.

Dessa forma, foram selecionadas as seguintes substâncias minerais:

- Ferro;
- Manganês;
- Níquel;
- Nióbio;
- Vanádio;
- Alumínio (bauxita);
- Cobre;
- Chumbo;
- Lítio;
- Terras raras;
- Cromo; e
- Zinco.

5.2 Índice Hershman-Hirshenfeld (HHI)

Com base nas considerações apresentadas no item 5.1 e, a partir dos dados de produção e reservas do *World Mining Data 2018* e do Serviço Geológico Americano, o Índice Hershman-Hirshenfeld foi calculado para as produções e reservas de cada substância mineral selecionada.

Produção

Tendo em vista a dificuldade em obtenção de dados de produção e reservas mundiais confiáveis, para o caso da produção, foram selecionadas duas bases distintas: o *World Mining Data 2018* (ano-base 2016) e a do Serviço Geológico Americano (*USGS Commodity Summary* – anos-base 2016 e 2017).

Os índices HHI obtidos para cada fonte de dados e ano-base encontram-se listados na **Tabela 4**. Com base nos resultados, é possível observar que, com exceção do cobre e do chumbo, os índices obtidos para as substâncias minerais selecionadas são coerentes em relação às duas bases de dados selecionadas.

As diferenças observadas no cobre devem-se ao maior detalhamento dos dados de países produtores no relatório do *World Mining Data 2018*, já que, a partir de determinada fatia da produção, o Serviço Geológico Americano agrega os dados na classe *outros países*, reduzindo, assim, o número de participantes e afetando o resultado calculado para o índice.

As produções registradas em 2017 de todas as *commodities* selecionadas, com exceção do níquel, estão acima do nível de 1.500 no índice HHI, limite que indica mercados moderadamente concentrados. Adicionalmente, as produções de nióbio, vanádio cobre, cromo, chumbo e lítio ultrapassam o nível de 2.500, indicando mercados altamente concentrados.

Reservas

Em relação aos dados de reserva, a dificuldade para obter dados globais é ainda maior, e a única fonte com informações que compila dados de reservas para o mundo todo corresponde ao Serviço Geológico Americano (*USGS Commodity Summary 2018* – ano-base 2017). Dessa forma, tais dados foram utilizados para este estudo; porém, correspondem ao grupo de informações de menor confiabilidade. Os resultados dos índices HHI para as reservas das substâncias minerais selecionadas neste estudo são apresentados na **Tabela 4**.

Assim como o observado nos dados de produção, as informações referentes às reservas de 2017 indicam que quase todas as *commodities* selecionadas estão acima

do nível de 1.500, com exceção da bauxita. Adicionalmente, destacam-se as reservas de níquel, nióbio, vanádio, chumbo, cromo, lítio e terras raras, cujos índices HHI calculados ultrapassa o limite de 2.500.

Para possibilitar uma avaliação conjunta dos dados de HHI para produção e reservas, de forma a verificar eventuais variações na fonte de cada substância mineral selecionada, os resultados obtidos para os dados de produção e reserva no ano-base de 2017, a partir das informações do Serviço Geológico Americano são apresentados de forma conjunta na **Figura 10**.

Tabela 4 – Índices Hershman-Hirshenfeld (HHI) obtidos para reservas e produção com base nos dados do Congresso Mundial de Mineração (ano-base 2016) e no Serviço Geológico Americano (anos-base 2016 e 2017).

<i>Commodity</i>	PRODUÇÃO		RESERVAS	
	HHI WMC - 2016	HHI USGS - 2016	HHI USGS - 2017	USGS 2017
Ferro ¹	2.015	2.020	2.010	1.591
Manganês	1.627	1.785	1.758	1.880
Níquel	949	959	995	8.638
Nióbio	8.413	8.050	8.072	9.113
Vanádio	3.573	3.918	3.663	3.067
Alumínio (bauxita)	1.788	1.747	1.747	1.436
Cobre	1.136	2.472	2.581	1.860
Chumbo	2.505	3.342	3.471	2.615
Lítio	2.749	3.051	3.200	3.210
Terras raras	7.219	6.834	6.430	7.169
Cromo	2.942	3.111	3.139	3.672
Zinco	1.687	1.978	1.982	1.556

¹ Para o cálculo do índice HHI da produção e da reserva, foram considerados dados de minério de ferro.

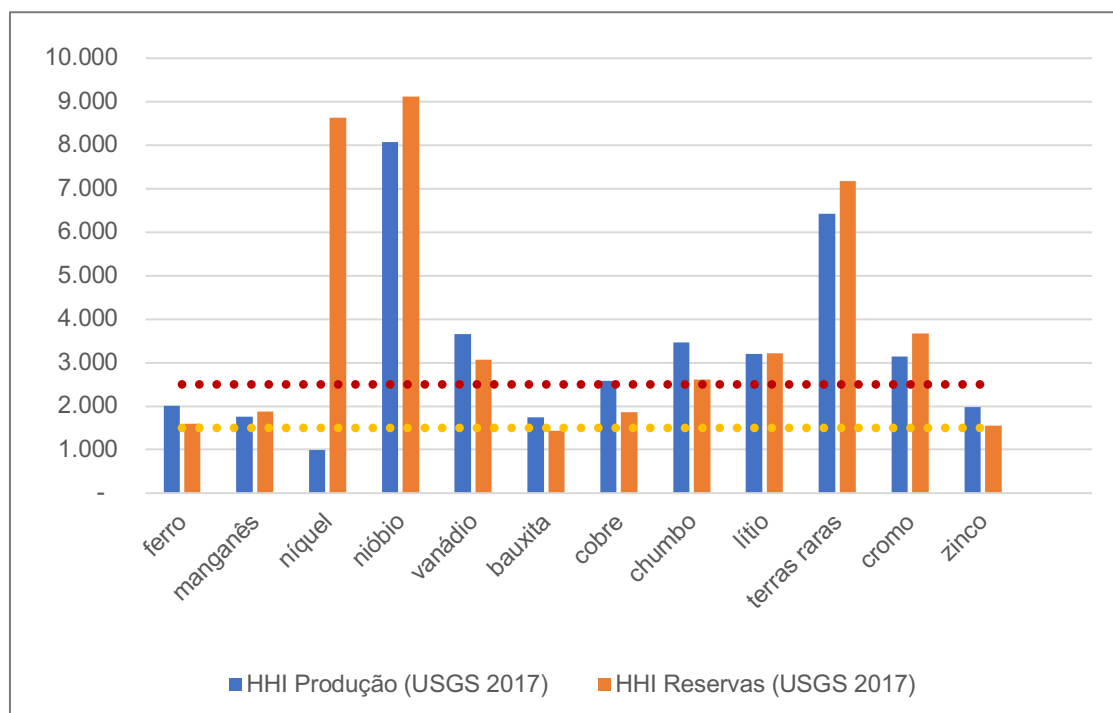


Figura 10 – Comparação entre os Índices Hershman-Hirshenfeld (HHI) calculados para produção e reservas a partir dos dados do Serviço Geológico Americano para o ano-base 2017. A linha tracejada amarela indica o limite dos mercados moderadamente concentrados (1.500) e a linha tracejada indica o limite de 2.500, acima do qual os mercados são considerados altamente concentrados.

De todos os casos analisados, os dois grupos de substâncias minerais com maior concentração, tanto de reserva quanto de produção correspondem ao nióbio e às terras raras.

No caso das terras raras, a produção é fortemente concentrada na China (82% em 2016 e 79% em 2017), que também detém a maior parte das reservas (37%); entretanto, o Brasil, apesar de não possuir produção de ETRs, tem a segunda maior participação nas reservas (18,33%) de acordo com os dados do Serviço Geológico Americano.

Nesse contexto, destaca-se o potencial de produção de ETR no município brasileiro de Minaçu, em Goiás, onde o primeiro projeto produção de terras raras do país está em desenvolvimento, encontrando-se atualmente na fase de licenciamento ambiental. O projeto é desenvolvido pela Mineração Serra Verde em depósito do tipo terras raras adsorvidos em argilas, ou íon-adsorvido, semelhante aos encontrados no sudeste da China, e tem previsão para entrar em operação em 2020⁴.

⁴ Serra Verde Mineração: <http://www.svpm.com.br/home>
Acesso em 01 de abril de 2019.

Em relação ao nióbio, o Brasil detém posição de destaque, com 95% das reservas globais e concentrando 89% da produção em 2017. As principais produções de nióbio ocorrem nos municípios de Araxá, em Minas Gerais e Catalão e Ovidor, em Goiás. Ambos os depósitos são em Complexos Carbonatíticos, com o pirocloro como mineral de minério. Atualmente, as operações em Araxá são desenvolvidas pela Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração – Companhia Mineradora do Pirocloro de Araxá (CBMM – COMIPA) e, em Catalão e Ovidor, pela Niobrás, uma subsidiária da China Molybdenum International (CMOC).

Dentre as matérias primas minerais com HHI acima de 2.500 para produção e reserva, destacam-se, ainda, o cromo, vanádio e o lítio.

Os dados de aplicação dos recursos minerais metálicos em tecnologias de baixo carbono, apresentados anteriormente no item 3.2, e os dados de produção e reserva discutidos nesta seção são organizados na **Tabela 5**.

Tabela 5 – Dados de índice HHI para produção e reserva, posição do Brasil na produção mundial e aplicações em tecnologias de baixo carbono para as substâncias metálicas selecionadas neste estudo.

<i>Commodity</i>	PRODUÇÃO			RESERVAS USGS 2017	POSIÇÃO DO BRASIL NA PRODUÇÃO MUNDIAL		NÚMERO DE TECNOLOGIAS DE BAIXO CARBONO PARA AS QUAIS O METAL TEM APLICAÇÃO	
	HHI WMC - 2016	HHI USGS - 2016	HHI USGS - 2017		Posição	Participação	Banco Mundial (2017)	Tokimatsu et al. (2018)
Ferro	2.015	2.020	2.010	1.591	3	17,22%	5	1
Manganês	1.627	1.785	1.758	1.880	5	7,41%	3	2
Níquel	949	959	995	8.638	8	4,38%	6	5
Nióbio	8.413	8.050	8.072	9.113	1	91,48%	-	1
Vanádio	3.573	3.918	3.663	3.067	4	9,29%	-	2
Alumínio (bauxita)	1.788	1.747	1.747	1.436	3	13,77%	7	2
Cobre	1.136	2.472	2.581	1.860	15	1,65%	7	10
Chumbo	2.505	3.342	3.471	2.615	27	0,19%	4	-
Lítio	2.749	3.051	3.200	3.210	7	0,80%	2	3
Terras raras	7.219	6.834	6.430	7.169	0	0,00%	7	7
Cromo	2.942	3.111	3.139	3.672	7	2,02%	4	-
Zinco	1.687	1.978	1.982	1.556	14	1,25%	2	-

5.3 Cobre

Dentre as matérias primas minerais com aplicação em tecnologias de baixo carbono, destaca-se o cobre, por possuir uma gama de aplicações em diferentes equipamentos.

Atualmente, o cobre é um dos principais metais utilizados pelo homem, e seu aproveitamento iniciou-se há mais de 7.000 anos, impulsionado por sua maleabilidade e existência de depósitos de fácil exploração, compatível com as tecnologias da época (Radetzki, 2009, Procobre, 2019). Avanços nas técnicas de aproveitamento do metal, tais como a fundição e a fabricação de ligas, expandiram sua produção e aumentaram sua utilidade. A partir de 1850, com a disseminação do uso da eletricidade, a demanda por esse metal cresceu consideravelmente e, apesar de substitutos como alumínio, plásticos e fibra ótica existirem para algumas aplicações, o cobre continua sendo amplamente utilizado pela humanidade (Radetzki, 2009).

Dentre as características do cobre, destacam-se sua maleabilidade, ductilidade, condutividade térmica e elétrica e capacidade de resistir à corrosão, que possibilitam sua utilização em uma gama de aplicações, notadamente nos setores de construção civil, transporte, telecomunicação, fabricação de equipamentos, na eletrônica e nas áreas de geração e transmissão de energia elétrica (Radetzki, 2009, Procobre, 2019) (**Figura 11**).

As vantagens para utilização do cobre incluem as propriedades físico-químicas acima listadas, a possibilidade de facilmente produzir ligas com outros metais, o fato de ser 100% reciclável e por possuir maior abundância e preços mais competitivos em relação a potenciais substitutos como ouro e prata (Visual Capitalist, 2018a).

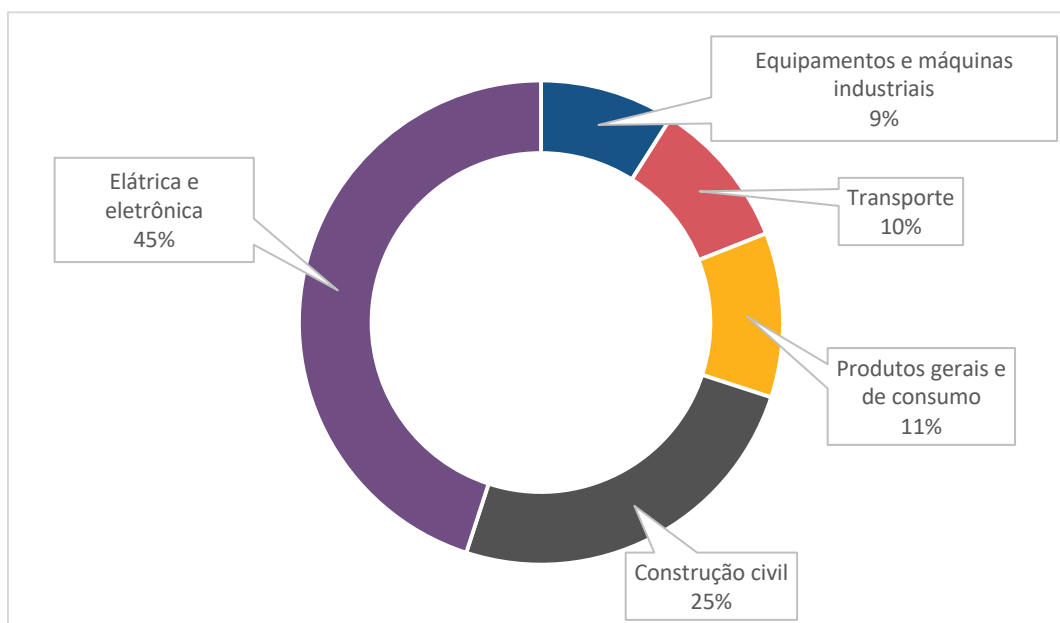


Figura 11 – Principais setores de uso final do cobre em 2015 (McKinsey Global Institute, 2016).

O cobre pode ser encontrado na natureza em sua forma elementar (cobre nativo) ou na estrutura de minerais, especialmente sulfetos e óxidos. Na **Tabela 6**, são apresentados os principais minerais de minério com as respectivas fórmulas químicas e teor de cobre contido.

Tabela 6 – principais minerais de minério de cobre com as respectivas fórmulas químicas e teores de cobre contido.

Mineral	Fórmula química	Teor de cobre
Calcopirita	CuFeS_2	34%
Calcosina	Cu_2S	80%
<u>Covelina</u>	CuS	66%
Bornita	Cu_5FeS_4	52-65%
Enargita	Cu_3AsS_4	48%
Cuprita	Cu_2O	89%

O principal modelo de depósito de cobre é o do tipo **cobre pórfiro**, o qual responde por 69% do metal contido em reservas conhecidas (**Tabela 7**). Outros

modelos de depósito incluem os do tipo **sedimentar** (*sediment-hosted*), que abarcam 12% do total de cobre contido; tipo **VMS** (*volcanogenic massive sulfide*), com 4,9% do total; depósitos de **sulfetos magmáticos**, perfazendo 5,1% do total; e depósitos **IOCG** (*iron oxide copper-gold*), com 4,7% do metal. Outros tipos de depósito, como os *skarns* e epitermais, respondem por 4,4% do cobre contido total. Dessa forma, pode-se notar que apenas dois tipos de jazimento – cobre pórfiro e cobre sedimentar – respondem por 80% de todo o cobre contido em reservas conhecidas. Adicionalmente, os 378 maiores depósitos de cobre, que perfazem 20% do número total de jazimentos, respondem por 92% do cobre contido, de forma que os 1.600 depósitos restantes abarcam apenas 8% de todo o cobre de depósitos conhecidos (Singer, 2017).

Os principais depósitos de cobre localizam-se no Chile, que também corresponde ao principal produtor, e são do tipo cobre pórfiro. Importantes depósitos também são encontrados nos Estados Unidos, Peru, China, República Democrática do Congo, Austrália, Zâmbia, México, Canadá, Indonésia e Rússia. Tais países correspondem aos principais produtores do metal (USGS, 2018;).

Dentre as principais empresas de mineração produtoras de cobre, destacam-se a estatal chilena Codelco, a estadunidense Freeport-McMoRan Copper & Gold, a anglo suíça Glencore International e a anglo australiana BHP-Billiton (Mining Intelligence, 2017; Federal Ministry of Sustainability and Tourism of Austria, 2018).

Tabela 7 – Tipos de depósitos e respectivos conteúdos de cobre em reservas conhecidas, conforme Singer (2017).

Tipo de depósito	Conteúdo de Cu (t)	Percentual do Cu total	Número de depósitos
Cobre pórfiro	1.862.000.000	69%	473
Cobre sedimentar	319.000.000	11,8%	182
Sulfetos magmáticos	138.000.000	5,1%	74
VMS	131.100.000	4,9%	900
IOCG	126.100.000	4,7%	34
Skarn	60.190.000	2,2%	182
Pb-Zn sedimentar	21.750.000	0,8%	59
Epitermal	5.809.000	0,2%	9

Tipo de depósito	Conteúdo de Cu (t)	Percentual do Cu total	Número de depósitos
Outros desconhecido	33.040.000	1,2%	65
Total	2.697.000.000	100%	1.978

Em relação à aplicação do cobre em tecnologias de baixo carbono, o metal é um material essencial por possuir aplicações diversas, incluindo em todo o sistema de energia elétrica, desde a geração até a distribuição e consumo, incluindo a transmissão de energia (Clean Energy Canada, 2017).

O cobre é empregado, também, na fabricação de equipamentos necessários à geração de energia eólica, solar, hidrelétrica, e nuclear, tecnologias de armazenamento de energia e carros elétricos. Nessa última categoria, o McKinsey Global Institute (2016) estima que veículos elétricos requerem, em geral, quatro vezes mais cobre do que os de motores a combustão interna.

Uma comparação realizada pela UBS Evidence Lab, em 2017, entre um veículo elétrico do modelo Chevrolet Bolt e um veículo de combustão interna modelo Volkswagen Golf concluiu que há 80% mais cobre no veículo elétrico, notadamente devido à sua aplicação no motor do carro elétrico, na fabricação do qual são utilizados cobre, aço e terras raras (**Figura 12**). Além disso, fiações de cobre também são utilizadas para conectar a bateria aos dispositivos eletrônicos do carro (UBS Evidence Lab, 2017).

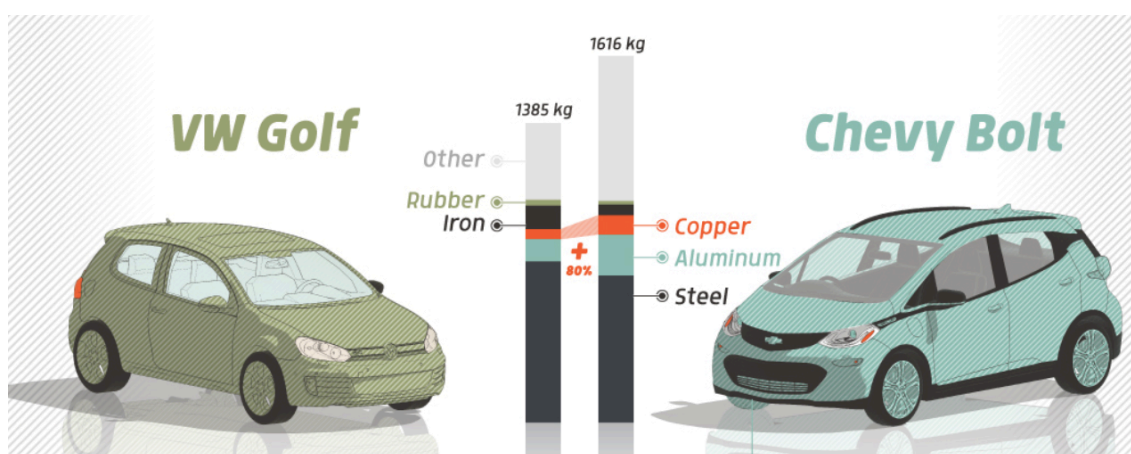


Figura 12 – Comparação dos materiais demandados para a fabricação de um veículo a combustão interna modelo Volkswagen Golf e um veículo elétrico modelo Chevrolet Bolt (Visual Capitalist, 2018b). Na imagem, *copper* = cobre, *aluminium* = alumínio, *steel* = aço, *iron* = ferro, *rubber* = borracha e *other* = outros.

Projeções de demanda para o cobre e análises de criticidade da oferta

As mesmas considerações feitas anteriormente em relação às incertezas envolvidas nas análises de crescimento da demanda de matérias primas minerais (**item 3.2**) devem ser consideradas no caso específico do cobre. Apesar da ampla aplicação do metal em virtualmente todas as tecnologias de geração de energia de baixo carbono, um eventual crescimento da demanda desse metal é sensível a fatores como (i) tipo de tecnologia que será mais utilizada e velocidade com que será adotada; (ii) políticas de incentivos governamentais para cumprimento do Acordo de Paris; (iii) taxa de crescimento global, em especial de países subdesenvolvidos e emergentes, e modelo de crescimento adotado (com mais ou menos equidade entre o padrão de vida de diferentes países); (iv) crescimento populacional e renda per capita; (v) avanços tecnológicos, entre outros.

Nesse contexto, diferentes trabalhos, aplicando análises e modelos específicos, projetam cenários distintos de projeções de oferta e demanda, com alguns apontando para riscos de escassez na oferta de cobre (ex.: Gordon *et al.*, 2006; Elshaki *et al.*, 2016; Schipper *et al.*, 2018); porém, todos indicando aumento na demanda do metal, apesar dos níveis desse aumento variarem conforme os itens listados anteriormente.

O McKinsey Global Institute estima um potencial de aumento da demanda por cobre de cerca de 2% ao ano, chegando a 31 milhões de toneladas em 2035, o que corresponde a um aumento de 43% em relação à demanda de 2015, de cerca de 22 milhões de toneladas (**Figura 13**) (McKinsey Global Institute, 2016).

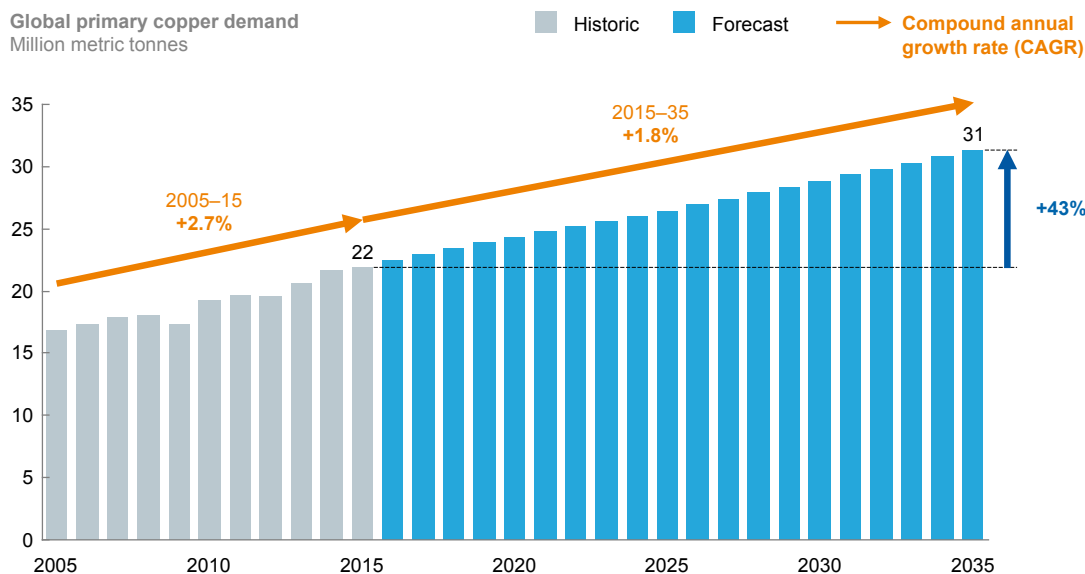


Figura 13 – Projeções para o aumento da demanda por cobre até 2035 em milhões de toneladas (*global primary copper demand*) (McKinsey Global Institute, 2016). Na figura: *historic* = dados históricos e *forecast* = projeções. Em laranja é indicada a taxa de crescimento anual global composta (*compound annual growth rate* – CAGR).

A partir de cinco cenários, considerando diferentes taxas de crescimento econômico global, desenvolvimento, equidade, crescimento populacional e adoção de tecnologias de baixo carbono no setor energético, e utilizando metodologias distintas, Schipper *et al.* (2018) estimam que a demanda por cobre pode aumentar de 3 a até 22 vezes a demanda atual até 2100.

Elshkaki *et al.* (2016) desenvolveram quatro cenários para evolução da oferta e demanda de cobre e concluem que se espera um aumento na demanda por cobre entre 275 a 350%, a depender do cenário, com projeções de criticidade de reserva até 2050 (**Figura 14**).

Tokimatsu *et al.* (2017) avaliam, a partir de uma abordagem holística do tipo *nexus*, que, em todos os cenários de penetrabilidade de energias de baixo carbono, há aumento na demanda por cobre; todavia, sem ultrapassar os níveis de reservas considerados. Os autores ressaltam que a principal questão a ser avaliada para o caso do cobre é que a demanda derivada das aplicações do metal em linhas de transmissão e nos sistemas de distribuição são consideravelmente maiores do que suas aplicações nos diversos sistemas de geração de energia.

Por outro lado, Singer (2017), apesar de também prever um aumento na demanda, impulsionada pelo crescimento econômico de países como China e Índia, indica que tal aumento deve estabilizar com o amadurecimento dessas

economias. Além disso, o autor considera dados de reservas atuais e de potenciais descobertas de novos depósitos para concluir que não há risco de escassez de cobre por um período de tempo considerável.

Dessa forma, apesar de incertezas em relação ao grau de aumento da demanda de cobre no futuro, todas as projeções apontam para um crescimento na utilização do metal, havendo espaço para ampliação da capacidade produtiva atual. Adicionalmente, tendo em vista o longo período necessário para a maturação e entrada em produção de um projeto de mineração, é necessário que países que almejam se beneficiar desse ciclo de aumento de demanda por cobre, bem como de outras matérias primas minerais, criem condições favoráveis ao investimento no setor mineral, e forma que possam responder oportunamente às variações do mercado.

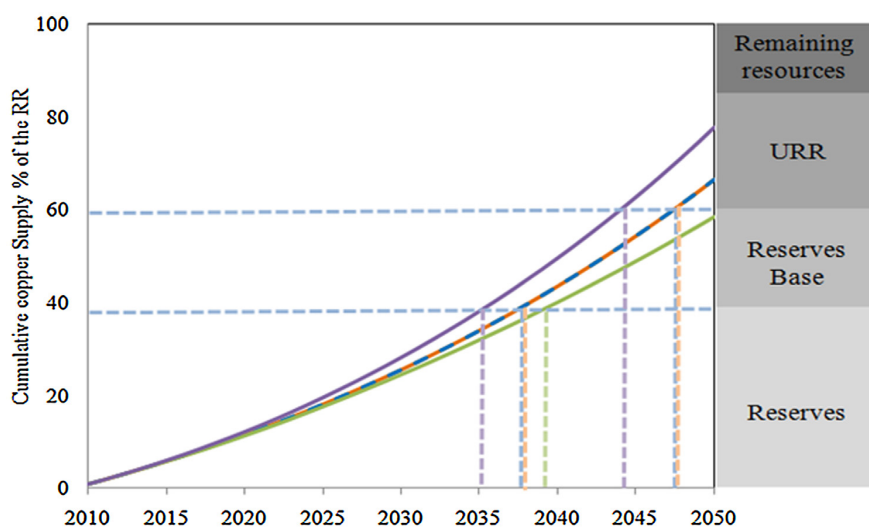
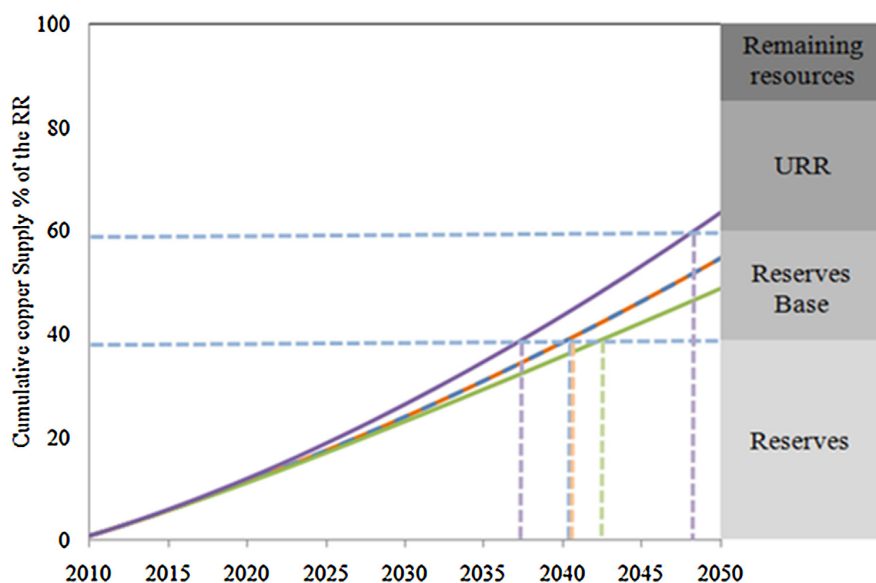
A**B**

Figura 14 – (A) Produção cumulativa de cobre para os quatro cenários analisados por Elshkaki *et. al* (2016) em relação às reservas consideradas. (B) produção cumulativa de cobre para os quatro cenários considerando que metade do cobre utilizado na condução e energia é substituído por um condutor não metálico. Nos dois casos, as linhas tracejadas indicam os anos nos quais a produção ultrapassa as estimativas de reservas e reservas de base utilizadas pelos autores. Nas figuras: *Reserves* = reservas; *Reserves Base* = reservas de base; *URR* = últimos recursos recuperáveis (*Ultimate Recoverable Resources*); *Remaining resources* = recursos remanescentes.

No caso da mineração do cobre, desafios adicionais da indústria devem ser levados em conta, como a progressiva diminuição dos teores dos depósitos conhecidos, implicando num aumento na demanda por energia elétrica e nos impactos ambientais gerados pela atividade de mineração (Elshkaki *et al.*, 2016). Atualmente, a indústria de mineração é uma das mais intensivas no uso de energia, e um importante emissor de CO₂. O consumo global de energia para a produção das principais substâncias minerais (ferro, alumínio, cobre, manganês, zinco e chumbo) aumentou de 32 EJ ao ano em 2007 a 52 EJ em 2012, o que perfaz cerca de 10% da energia primária total produzida nesse mesmo ano, sendo o cobre um dos metais cuja produção é mais intensiva em energia (Norgate & Jahanshahi, 2011; Fizaine & Court, 2015; Elshkaki *et al.*, 2016).

Para evitar um aparente paradoxo entre a necessidade crescente de consumo de cobre para viabilizar a transição para uma economia de baixo carbono e o aumento do impacto ambiental causado pela intensificação da atividade de mineração, associada à exploração de depósitos com teores cada vez menores, faz-se necessário que o setor mineral adote boas práticas de sustentabilidade visando a diminuir seus impactos ambientais de forma a garantir a sustentabilidade de toda a cadeia de fornecimento de matérias primas minerais.

Nesse sentido, a indústria mineral canadense é uma das mais avançadas na adoção de tecnologias verdes e práticas sustentáveis no próprio processo de mineração. A *Mining Association of Canada* criou o programa *Towards Sustainable Mining*⁵ (*Em Direção a uma Mineração Sustentável*), o qual abarca uma série de ferramentas e indicadores que devem ser adotados por seus membros para impulsionar o desempenho do setor e gerenciar com responsabilidade os riscos da atividade de mineração (Clean Energy Canada, 2017).

A adoção de energias renováveis no setor mineral vem ganhando espaço nos últimos anos, especialmente devido ao fato de que, por geralmente se desenvolver em áreas afastadas e desconectadas nos sistemas nacionais de geração e transmissão de energia elétrica, os projetos de mineração geram sua própria energia, e a adoção de sistemas baseados em fontes renováveis se torna um melhor custo-benefício a médio prazo. Dessa forma, África e Austrália se tornaram referências na adoção de sistemas de geração de energia solar a

⁵ The Mining Association of Canada, *Towards Sustainable Mining*. <http://mining.ca/towards-sustainable-mining>. Acesso em 22 de março de 2019.

operações de mineração, enquanto no Canadá e América Latina predomina a adoção da energia eólica (Clean Energy Canada, 2017).

5.4 Produção brasileira de cobre

Com base em dados *World Mining Data 2018*, em 2016, o Brasil ocupou a 15ª posição no *ranking* de países produtores de cobre, e registra produção do metal nos estados do Pará (municípios de Canaã dos Carajás, Marabá, Curionópolis e Itaituba), Bahia (Jaguarari e Curaçá) e Goiás (Alto Horizonte). Além disso, o cobre ocorre como subproduto do níquel em Niquelândia (GO) e Fortaleza de Minas (MG) (**Figura 15**).

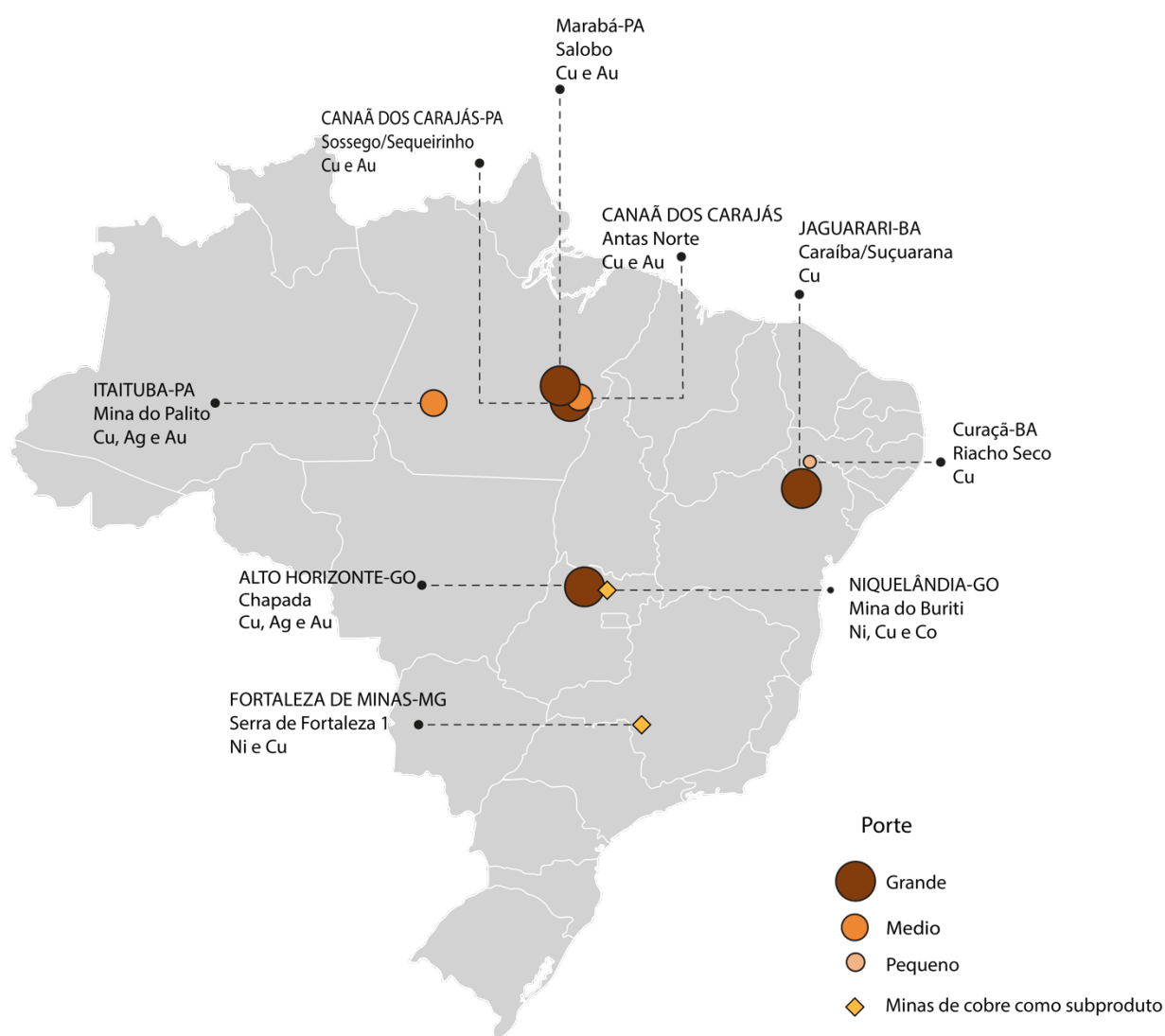


Figura 15 – Localização das principais unidades produtoras de cobre no Brasil, de acordo com dados declarados no RAL ano-base 2017.

De 2015 a 2018, foram produzidas 402.807.094 toneladas de minério de cobre (**Tabela 8**) e 5.229.380 toneladas de concentrado de cobre, com teor médio de 29,85% (**Tabela 9, Figura 16**). Nesse período, o Pará respondeu por 77,18% da produção total de concentrado, seguido por Goiás (18,05%) e Bahia (4,77%) (**Figura 17**). Os aumentos na produção observados em 2017 e 2018 devem-se, principalmente, à expansão da produção das minas de Sossego e Salobo, ambas operadas pela Vale S.A. e localizadas no Pará, na região de Carajás.

O valor da produção mineral de cobre de 2015 a 2018 totalizou em R\$ 33.209.889.959 (**Tabela 10**) correspondendo, em 2017, ao segundo principal bem mineral brasileiro, atrás apenas do minério de ferro. Ressalta-se que, em todos os estados nos quais há produção de cobre, há ocorrência de ouro como subproduto, o que aumenta o valor do concentrado.

Atualmente, a principal empresa produtora de cobre é a Vale S.A., com destaque para a mina do Salobo, no Pará, cuja produção iniciou em 2012 e alavancou consideravelmente as exportações brasileiras de cobre, bem como a participação dessa *commodity* no valor da produção mineral brasileira (**Figura 18**). Em 2018, a mina do Salobo respondeu por 44,5% do valor da produção nacional de cobre.

Ressalta-se que, atualmente, a produção brasileira de concentrado de cobre é quase toda voltada à exportação, com apenas uma empresa de fundição (*smelter*) no Brasil, a Paranapanema S.A, a qual opera na fundição de cobre e produção de semimanufaturados de cobre e suas ligas, com atividades nos municípios Dias D'Ávila, na Bahia, Utinga, em São Paulo, e Serra, no Espírito Santo.

Em relação aos teores, destacam-se os depósitos da Mina do Vermelho e Mina Caraíba, ambas da Mineração Caraíba S.A., localizadas, respectivamente, em Juazeiro e Jaguarari (BA), e a mina Antas Norte, da Avanco Mineração, em Curionópolis (PA), com teores acima de 1,5% de cobre contido.

A principal modalidade de lavra empregada na mineração do cobre no Brasil é a céu aberto, com lavra em bancada em cava. As duas únicas minas subterrâneas de cobre do país localizam-se na Bahia e são operadas pela Mineração Caraíba S.A.

Tabela 8 – Produção bruta de cobre no período de 2015 a 2018. Fonte: Relatório Anual de Lavra (RAL) – Agência Nacional de Mineração.

Ano-base	Produção R.O.M. (t)	Cu contido (t)	teor (%)
2015	80.176.949	509.506	0,64%
2016	89.673.941	543.052	0,61%
2017	111.340.233	616.934	0,55%
2018	121.615.971	873.365	0,72%
Total	402.807.094	2.542.857	0,63%

Tabela 9 – Produção beneficiada de cobre no período de 2015 a 2018. Fonte: Relatório Anual de Lavra (RAL) – Agência Nacional de Mineração.

Ano-base	Concentrado (t)	Cu contido (t)	teor (%)
2015	1.171.669	359.848	30,71%
2016	1.113.016	337.628	30,33%
2017	1.283.760	384.542	29,95%
2018	1.660.936	477.987	28,78%
Total	5.229.380	1.560.737	29,85%

Tabela 10 – Produção comercializada de concentrado de cobre no período de 2015 a 2018. Fonte: Relatório Anual de Lavra (RAL).

Ano-base	Concentrado (t)	Valor (R\$)
2015	1.717.683	7.066.721.092
2016	1.104.101	5.521.753.117
2017	1.279.093	8.368.906.676
2018	1.635.761	12.252.509.074
Total	5.736.638	33.209.889.959

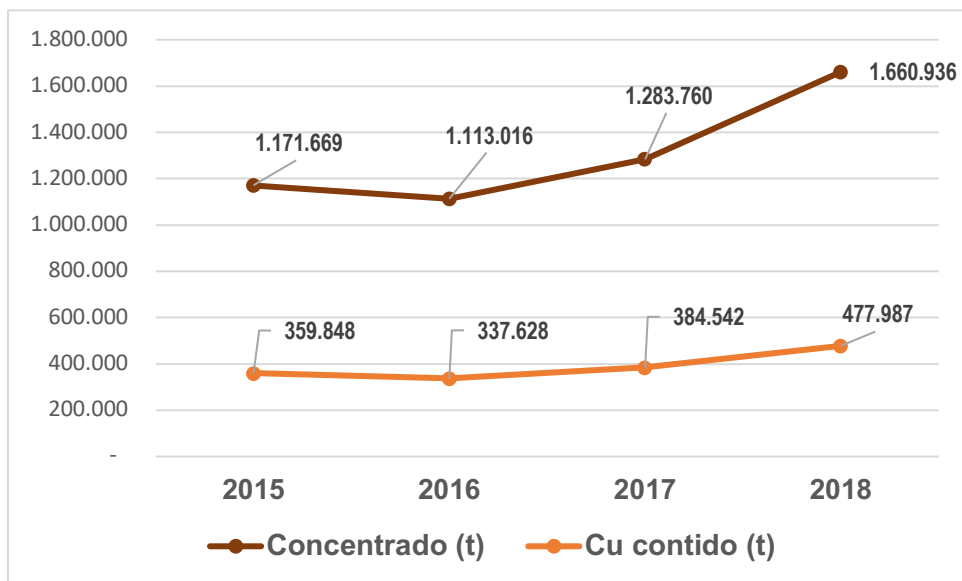


Figura 16 – Produção beneficiada de cobre no período 2015 a 2018. Dados de concentrado e cobre contido em toneladas. Fonte: Relatório Anual de Lavra (RAL) – Agência Nacional de Mineração.

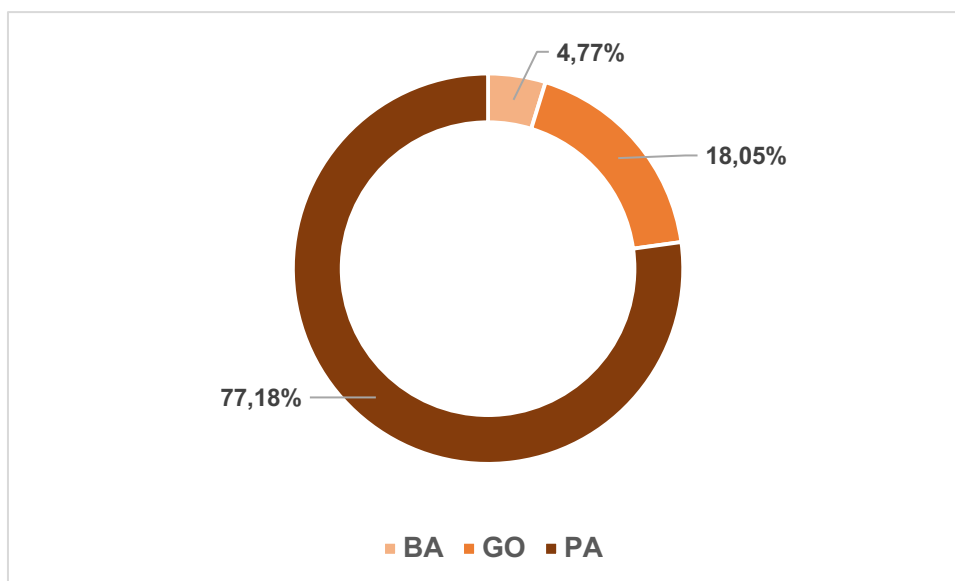


Figura 17 – Participação dos três estados brasileiros produtores de cobre no total da produção de concentrado registrada no período 2015 – 2018. Fonte: Relatório Anual de Lavra (RAL) – Agência Nacional de Mineração.

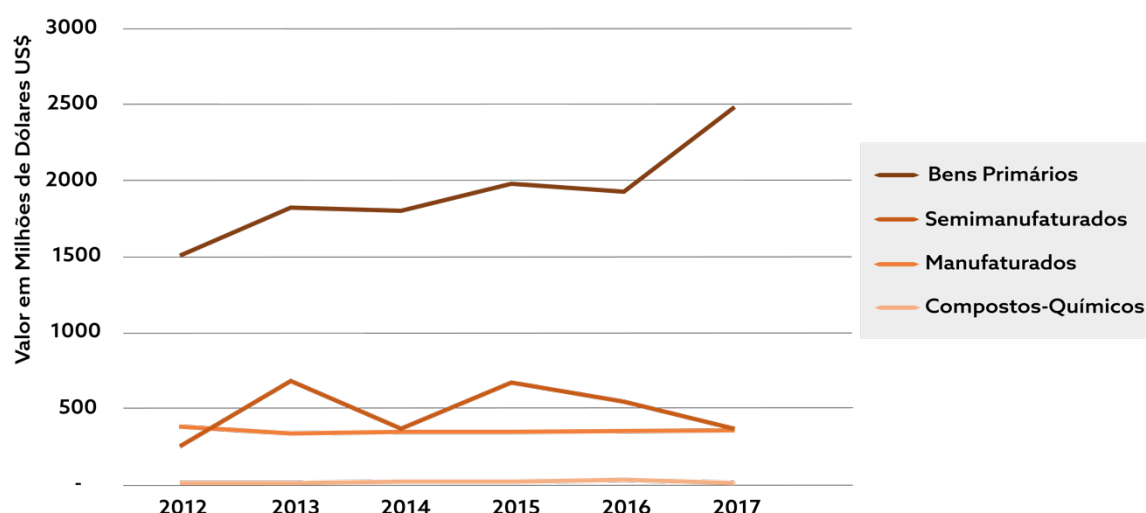


Figura 18 – Exportações de cobre por classe de produto (bens primários, semimanufaturados, manufaturados e compostos químicos) para o período 2012-2017. Fonte: ComexStat – Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços.

Em 2018, foi registrada uma produção bruta de 121.616.070 toneladas R.O.M. de minério de cobre com um teor médio de 0,6%, e uma produção beneficiada de 1.660.936 toneladas de concentrado de cobre. Esse resultado representa um marco na produção brasileira de cobre, correspondendo ao maior valor registrado nos últimos anos. Da mesma forma, em 2018, o valor da produção comercializada foi de R\$ 12.252.509.074, valor 46% maior que o registrado para 2017.

Com base nos dados de produção mundial de cobre de 2016 do *World Mining Data 2018* e de 2017 do Serviço Geológico dos EUA, a produção brasileira de 2018 é superior à produção registrada para os Estados Unidos nesses dois anos, nos quais este país ocupou a quarta posição no *ranking* de países produtores.

Em relação a projeções futuras de produção e capacidade do setor mineral de cobre de ampliar a produção, no Relatório Anual de Lavra referente ao ano-base de 2018, foi declarada uma capacidade instalada total para a produção bruta de 90.122.000 toneladas de minério ao ano, valor 26% menor que a produção declarada no mesmo ano. Dessa forma, considera-se que os dados declarados são inconsistentes e não poderão ser utilizados para avaliação do nível de ociosidade do setor.

Alternativamente, a projeção da produção de concentrado de cobre para os anos de 2019, 2020 e 2021 totalizam 3.313.859, 3.030.087 e 3.363.656 toneladas, respectivamente, correspondendo a incrementos de 103%, 85% e

106% na produção em relação aos níveis de 2018. Caso tais projeções se concretizem, a produção brasileira de cobre alcançará patamares importantes, superiores aos registrados pelo Peru, segundo principal produtor, nos anos de 2016 e 2017. Tal cenário reposicionaria o Brasil no cenário mundial da mineração do cobre. Cabe ressaltar, entretanto, que tais dados devem ser avaliados com cautela, por terem caráter declaratório e tratarem-se de projeções de produção que podem não se concretizar.

Adiciona-se a esse cenário, o desenvolvimento de importantes projetos de pesquisa mineral para cobre em andamento em diferentes regiões do país, dentre os quais destacam-se o projeto da empresa Anglo American na Província de Alta Floresta, no Mato Grosso e Sul do Pará. Os primeiros resultados indicam que o prospecto se trata de depósito do tipo cobre pórfiro. Apesar dos trabalhos de pesquisa ainda não permitirem avaliações sobre a viabilidade do projeto, caso seja confirmada a jazida, o projeto poderá corresponder a uma das principais descobertas da década com potencial para reposicionar o Brasil entre os principais produtores de cobre. Os requerimentos inicialmente realizados pela empresa totalizavam 284 blocos, abarcando quase 1,9 milhões de hectares⁶.

Também no Mato Grosso, a empresa Altamira Gold desenvolve projeto de pesquisa para cobre, com mais de 200.000 hectares na região, e a empresa Nexa Resources S.A. desenvolve o projeto Aripuanã, o qual irá produzir Zn, Pb e Cu. Em dezembro de 2018, a empresa anunciou ter obtido a Licença de Instalação junto ao órgão ambiental do estado⁷.

Adicionalmente, a Nexa Resources também desenvolve o projeto Caçapava do Sul, no Rio Grande do Sul, também para produção de Zn, Pb e Cu, com previsão de desenvolvimento de mina com três cavas a céu aberto com vida útil de 20 anos. Esse projeto tem potencial de recolocar o Rio Grande do Sul entre estados produtores de cobre uma vez que a primeira mina de cobre do Brasil foi desenvolvida nesse estado ainda no século XIX.

Os cenários apresentados indicam um panorama de expansão da produção brasileira de cobre, num contexto positivo de valorização da *commodity* no mercado internacional, com projeções de crescimento da demanda ao longo de todo o século, impulsionados pelo crescimento das tecnologias de baixo

⁶ <https://exame.abril.com.br/negocios/anglo-american-e-autorizada-a-prospectar-cobre-em-mt-e-no-pa/>. Acesso em 05 de abril de 2019.

⁷ <https://ri.nexaresources.com/Download.aspx?Arquivo=EnD2PVZf7NRR56nJpcsqGA==&IdCanal=Ny3+tGR+zKsY3DSJghT06w==>. Acesso em 08 de abril de 2019.

carbono e, também, pelo desenvolvimento econômico de países como Índia e China.

Nesse panorama, para que o país possa aproveitar o cenário positivo, atraindo investimentos e viabilizando projetos com potencial para desenvolver regiões e aumentar a arrecadação do Estado, o papel da regulação no setor mineral ganha destaque, com o potencial de melhorar a qualidade da ação governamental, reduzindo custos regulatórios e fomentando a governança e boas práticas no setor.

Além disso, num contexto em que a atividade de mineração passa por uma crise de imagem junto à sociedade, como consequência dos desastres com barragens de rejeito em Mariana e Brumadinho, é necessário que o setor reveja suas práticas de forma a minimizar o impacto associado ao desenvolvimento da atividade de mineração, seguindo modelos mais sustentáveis.

Por fim, tendo em vista a crescente aplicação do cobre e outros metais em tecnologias de baixo carbono, há uma relação intrínseca entre os setores mineral e ambiental, o quais tradicionalmente colocam-se em oposição. Dessa forma, com base na forte dependência das tecnologias de baixo carbono por matérias primas minerais, é recomendável o desenvolvimento de diálogo entre os dois setores, de forma a garantir a sustentabilidade de toda a cadeia produtiva das tecnologias de baixo carbono, possibilitando, assim, o cumprimento das metas pactuadas no Acordo de Paris.

6 Conclusões

A atividade de mineração é essencial para a manutenção e desenvolvimento do padrão de vida das sociedades atuais. Dessa forma, é necessário que seja encarada como parte da solução para as questões ambientais que, desde a década de 1970 do século passado, vêm ganhando importância no cenário mundial.

O setor mineral brasileiro possui potencial para atender ao aumento de demanda por bens minerais metálicos impulsionada pela adoção de tecnologias de baixo carbono, na esteira das metas postuladas pelo Acordo de Paris.

Dentre as principais substâncias metálicas identificadas em estudos de projeção de demandas e criticidade de materiais que têm produção ou reservas no Brasil, destacam-se o ferro, manganês, níquel, nióbio, vanádio, alumínio, cobre, cromo, lítio, chumbo cromo, zinco e terras raras. A produção dessas substâncias minerais é caracterizada por mercados moderadamente

concentrados a concentrados, em especial nos casos do nióbio, terras raras e vanádio. Com base em dados de produção global e nacional dessas substâncias, bem como na aplicação em tecnologias de baixo carbono, ressalta-se que o Brasil possui vantagens competitivas na produção de nióbio, vanádio e minério de ferro.

Destaca-se, ainda, o cenário atual da exploração e produção de cobre no país, com potencial de expansão da produção de projetos já em operação, bem como o desenvolvimento de novos projetos que podem reposicionar o país no cenário mundial de produção de cobre. Ressalta-se que esse metal é considerado essencial para a transição global a uma economia de baixo carbono, uma vez que possui uma ampla gama de aplicações devido às suas características físico-químicas.

Ressalta-se que um eventual ciclo de valorização de *commodities* minerais pode favorecer o Brasil, caso o país saiba aproveitar suas vantagens competitivas no setor, fomentando investimentos e gerando riquezas, as quais são estratégicas para alavancar o desenvolvimento socioeconômico do país. Dessa forma, a opção de não desenvolver o setor mineral brasileiro abarca o risco de o país não aproveitar tal contexto de valorização de *commodities*, deixando de gerar riquezas que podem fomentar o desenvolvimento não apenas das regiões afetadas pela atividade, mas, também, do país como um todo.

Nesse contexto, o desafio da atividade de mineração, em especial da indústria do cobre em uma perspectiva global, que vem trabalhando em depósitos com teores cada vez menores, é minimizar os impactos causados pelas atividades de mineração e transformação mineral, de forma a não invalidar os esforços para cumprimento do Acordo de Paris, garantindo a sustentabilidade de toda a cadeia produtiva de tecnologias de baixo carbono. Tal premissa é cada vez mais cobrada do setor e vem moldando a indústria mineral nos últimos anos.

Cabe destacar, ainda, que, a situação atual é estratégica para a revitalização do setor mineral brasileiro, tendo em vista o tempo decorrido entre a fase de pesquisa e o início da operação de um projeto de mineração, que pode ser superior a dez anos. Tal fato restringe velocidade da capacidade de resposta do setor para atender às variações na demanda por matérias primas minerais, de forma que a atividade precisa se desenvolver em um ambiente dinâmico que fomente a inovação.

Por fim, num contexto de aumento da demanda por metais para viabilizar medidas de geração de energia com baixa emissão de GEE, faz-se necessário que os setores ambiental e mineral, tradicionalmente antagônicos, busquem aproximação, de forma a prover soluções conjuntas para as questões

ambientais. A atividade de mineração é movida pela demanda das sociedades, com papel vital na história da humanidade. Dessa forma, é necessária uma conscientização da sociedade de que o aumento na demanda por bens minerais para aplicações em diversos fins, e não apenas nas chamadas tecnologias verdes, tem implicações na ampliação da oferta a qual, por sua vez, só pode ocorrer por meio do desenvolvimento da atividade de mineração a qual, se conduzida de forma racional, deve ser encarada como peça chave para o desenvolvimento de soluções para questões sociais e ambientais.

7 Referências Bibliográficas

Achzet, B.; Helbig, C. 2013. How to evaluate raw material supply risks – an overview. *Resources Policy*, 38 435–447.

Agência Nacional de Mineração (ANM), 2019. Anuário Mineral Brasileiro 2018 – principais substâncias metálicas. Brasília, 34 p.

Alonso, E.; Sherman, A. M.; Wallington, T. J.; Everson, M. P.; Field, F. R.; Roth, R.; Kirchain, R. E. Evaluating rare earth element availability: a case with revolutionary demand from clean technologies. *Environmental Science and Technology*, 46:3406–14, 2012.

Ali, S. H.; Giurco, D.; Arndt, N.; Edmund, N.; Brown, G.; Demetriades, A.; Durrheim, R.; Eriquez, M.A.; Kinnard, J.; Littleboy, A.; Meinert, L. D.; Oberhänsli, R.; Salem, J.; Schodde, R.; Schneider, G.; Vidal, O.; Yakovleva, N. 2017. Mineral Supply for Sustainable Development Requires Resource Governance. *Nature* 543 (7645), 367–72.

Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento / Banco Mundial. 2017. The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future. Washington DC. 92 p.

Brown, W. M. The meaning of scarcity in the 21st century: drivers and constraints to the supply of minerals using regional, national and global perspectives. Volume IV, Sociocultural and Institutional Drivers and Constraints to Mineral Supply, US Geological Survey Open-File Report 02–333, 121p, 2002.

Buchert, M.; Schüler, D.; Bleher, D. Critical metals for future sustainable technologies and their recycling potential. United Nations Environment Program, United Nations University, Paris, 2009.

Channell, J.; Jansen, H.; Syme, A.; Savvantidou, S.; Morse, E.; Yuen, A. 2013. Energy Darwinism: The Evolution of the Energy Industry. Citi Global Perspectives and Solutions.

Clean Energy Canada. 2017. Mining for Clean Energy – Tracking the Energy Revolution 2017. Centre for Dialogue – Simon Fraser University, Vancouver, Canada. 9 p.

Curi, A. (2017) Lavra de minas. Oficina de Textos. São Paulo.

De Koning, A.; Kleijn, R.; Huppes, G.; Sprecher, B.; van Engelen, G; Tukker, A. (2018). Metal supply constraints for a low-carbon economy? Resources, Conservation & Recycling 129. 202–208.

Elshaki, A.; Graedel, T. E.; Ciacchi, L.; Reck, B. K. 2016. Copper demand, supply, and associated energy use to 2050. Global Environmental Change 39, 305–315

Erdmann, L.; Graedel, T. Criticality of non-fuel minerals: a review of major approaches and analyses. Environmental Science and Technology, 45, 7620–7630, 2011.

Federal Ministry of Sustainability and Tourism of Austria. 2018. World Mining Data 2018 – iron and ferro alloy, metals, non-ferrous metals, precious metals, industrial minerals, mineral fuels. International Organizing Committee for the World Mining Congresses, Viena. 250 p.

Fizaine, F., Court, V., 2015. Renewable electricity producing technologies and metal depletion: a sensitivity analysis using the EROI. Ecol. Econ. 110, 106–118.

Fórum Mundial Econômico. 2014. Scoping Paper: Mining and Metals in a Sustainable World. World Economic Forum Mining & Metals Industry Partnership. Genebra, Suíça, 23 p.

Frankfurt School-UNEP Centre/BNEF. 2018. Global Trends in Renewable Energy Investment 2018, <http://www.fs-unep-centre.org> (Frankfurt am Main).

Gordon, R. B.; Bertram, M.; Graedel, T. E. 2006. Metal stock and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America (PNAS)* 103-5; 1209-1214 p.

Graedel, T. E.; Barr, R.; Chandler, C.; Chase, T.; Choi, J.; Christoffersen, L.; Friedlander, E.; Henly, C.; Jun, C.; Nassar, N. T.; Schechner, D.; Waren, S.; Yang, M.; Zhu, C. 2012. Methodology of Metal Criticality Determination. *Environmental Science & Technology* 46, 1063–107.

Greenfield A., Graedel T.E. 2013 The omnivorous diet of modern technology. *Resour Conserv Recycl* 74: 1–7. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344913000396>. Accessed 29 October 2013.

IEA 2018. Statistics data Browser – Electricity generation by fuel, world 1990 – 2016. International Energy Agency
<https://www.iea.org/statistics/?country=WORLD&year=2016&category=Energy%20supply&indicator=TPESbySource&mode=chart&dataTable=BALANCES>.
 Acesso em 29/11/2018.

IRENA 2018. Renewable Power Generation Costs in 2017. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

Kleijn, R.; van der Voet, E.; Kramer, G. J.; van Oers, L.; van der Giesen, C. 2011. Metal requirements of low-carbon power generation. *Energy* 36 5640-5648.

McKinsey Global Institute. 2016. Beyond the supercycle: How technology is reshaping resources. p.69 <http://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability-and-resource-productivity/our-insights/how-technology-is-reshaping-supply-and-demand-for-natural-resources>

Mining Intelligence 2017. Top 10 copper mining companies in 2016. <http://www.mining.com/top-10-copper-mining-companies-2016/>. Acesso em 22 de março de 2019.

Morley, N.; Eatherley, D. Material Security: Ensuring Resource Availability for the UK Economy. Oakdene Hollins, Ltd., Chester, UK. 2008.

Norgate, T., Jahanshi, S., 2010. Low grade ores – Smelt, leach or concentrate? *Miner. Eng.* 23, 65–73.

Nuss P, Eckelman MJ (2014) Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis. *PLoS ONE* 9(7): e101298. doi:10.1371/journal.pone.0101298.

Instituto Brasileiro do Cobre – Procobre, 2019. *International Copper Association*. <https://www.procobre.org/pt/nos/>. Acesso em 22 de março de 2019.

Radetzki, M. Seven thousand years in the service of humanity—the history of copper, the red metal. *Resources Policy*, v. 34, n. 4, p. 176–184, dez. 2009.

Roelich, K.; Dawson, D. A.; Purnell, P.; Knoeri, C.; Revell, R.; Busch, J.; Steinberger, J. K. Assessing the dynamic material criticality of infrastructure transitions: A case of low carbon electricity. *Applied Energy*, 123 378-386, 2014.

Rosenau-Tornow, D.; Buchholz, P.; Riemann, A.; Wagner, M. Assessing the long-term supply risks for mineral raw materials – a combined evaluation of past and future trends. *Resources Policy*, 34 161–175, 2009.

Schipper, B. W.; Lin, H. C.; Meloni, M. A.; Wansleeben, K.; Heijungs, R.; van der Voet, E. 2018. Estimating global copper demand until 2100 with regression and stock dynamics. *Resources, Conservation & Recycling* 132, 28–36.

Singer, D. A. 2017. Future copper resources. *Ore Geology Reviews* 86, 271–279.

Tokimatsu, K.; Wachtmeister, H.; Mc Lellan, B.; Davidsson, S.; Murakami, S.; Höök, M.; Yasouka, R.; Nishio, M. 2017. Energy modeling approach to the global energy-mineral nexus: A first look at metal requirements and the 2°C target. *Applied Energy* 207. 494–509

Tokimatsu K, Yasuoka R, Nishio M. 2018. Global zero emissions scenarios: the role of biomass energy with carbon capture and storage by forested land use. *Appl Energy* 185(Part 2): 1899–906.

Visual Capitalist. 2018a. Copper: Driving the Green Energy Revolution. <https://www.visualcapitalist.com/copper-driving-green-energy-revolution/> Acesso em 22 de março de 2019.

Visual Capitalist. 2018b. How Much Copper is in an Electric Vehicle? <https://www.visualcapitalist.com/how-much-copper-is-in-an-electric-vehicle/> Acesso em 22 de março de 2019.

UBS Evidence Lab. 2017. Electric Car Teardown – Disruption Ahead? Q-Series. <https://neo.ubs.com/shared/d1wkuDIEbYPjF/> Acesso em 22 de março de 2019.

United States Department of Justice and Federal Trade Commission. 2006. Horizontal merger guidelines. Washington, DC; p. 15–19.

United States Geological Survey (USGS), 2017. Copper; Mineral Commodity Summaries 2017 U.S. Geological Survey. 202 p., <https://doi.org/10.3133/70180197>.

United States Geological Survey (USGS), 2018. Copper; Mineral Commodity Summaries 2018 U.S. Geological Survey. 200 p., <https://doi.org/10.3133/70194932>.