

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Potencial Brasileiro de Atendimento da Demanda de Cobre Provocada pela
Diversificação das Fontes Renováveis de Energia do Brasil em um Cenário de
Cumprimento das Metas do Acordo de Paris de 2015**

Monografia
21-43

Aluno: Santiago Herrera de Santana
Orientador: Prof. Dr. Caetano Juliani

SÃO PAULO
2021

A todos que, de alguma forma, me fizeram chegar até esse momento.
Aos meus pais que sempre me fizeram acreditar que eu podia ser o que quisesse.
A Nádia, a Bia e ao Nick, por estarem comigo mesmo separados pela distância e
pela vida adulta.
Aos meus amigos da Geo, parceiros de perrengue nestes últimos anos – Lari, Rico,
Waze, Kiwi, Bibifa, Nit e Lilo, eu não teria conseguido sem vocês.
Ao GEJ por me mostrar todo dia o que é ter orgulho de ser quem é.
A Mai e a Luíza por dividirem esse comecinho de nova fase comigo.
Ao Prof. Caetano pela orientação e por me apoiar na ideia de Trabalho Final
À educação pública!

SUMÁRIO

Resumo	04
Abstract	05
Introdução	06
a. Contextualização das metas estabelecidas no Acordo de Paris	06
b. A importância do setor elétrico/energético no combate às mudanças climáticas	07
c. A importância do suprimento de <i>commodities</i> minerais para o atingimento das metas brasileiras	09
1. Como funcionam as tecnologias geradoras de energia solar e eólica?	12
a. Funcionamento dos painéis solares	12
b. Funcionamento das turbinas eólicas	15
2. Como funcionam as cadeias produtivas das tecnologias estudadas?	18
a. Depósitos de cobre no Brasil	19
b. Cobre metálico.....	24
c. Fabricação dos painéis solares	28
d. Fabricação das turbinas eólicas	31
3. Cálculo da demanda de cobre para atingimento das metas brasileiras	36
a. Premissas	36
b. Cálculos	36
c. Projeções de Produção de Cu até 2030	41
4. Conclusão	44
Referências Bibliográficas	46

Resumo

A comunidade internacional tem como centro do debate as medidas necessárias para que se evitem os piores efeitos das mudanças climáticas ao longo do restante do século. Para que se alcancem esses objetivos, os países criam compromissos frente aos seus pares, através dos quais esses se comprometem a diminuir as suas emissões de gases do efeito estufa. Regularmente, esses compromissos – as NDCs (Contribuições Nacionalmente Determinadas, em inglês) - revistos em encontros organizados pelas Nações Unidas, as chamadas Conferências das Partes (COPs). As primeiras NDCs foram estabelecidas no âmbito da COP21, em Paris.

Para o atingimento dessas metas, são necessárias ações rápidas de descarbonização da economia mundial, processo que tem como início a descarbonização da matriz energética mundial, visto que é essa que alimenta todos os demais processos produtivos. Assim, coloca-se como prioridade, no momento atual, que se viabilize a extensão das capacidades instaladas de geração de energia renovável nos países, e o Brasil, apesar de já possuir uma matriz elétrica mais limpa que a média global, não é exceção.

Estas tecnologias – painéis solares e turbinas eólicas, especialmente – apesar de gerarem energia menos intensa em carbono, levam uma elevada quantidade de metais e outras *commodities* minerais na sua produção. Dessa forma, cria-se uma oportunidade para países com um elevado potencial mineral, como o Brasil, de não só fornecer essa matéria prima para um mundo que busca essa descarbonização, como também de suprir o seu próprio processo de *commodities* em abundância e a menor preço.

Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar qual a capacidade do país de atingir o seu próprio compromisso, estabelecido no Acordo de Paris, a partir do olhar do abastecimento de cobre. Foram utilizadas as projeções estabelecidas pela Empresa de Pesquisa Energética em 2016, após a submissão da primeira NDC brasileira, e a capacidade instalada de energia solar e eólica no país até 2020 para chegar a um volume de cobre que seria demandado para o atingimento dessa meta. Utilizando intensidades de cobre para as principais tecnologias de painéis solares e turbinas eólicas encontradas na literatura, chegou-se a uma demanda total de cobre que equivale a, aproximadamente, 5% do volume de liga de cobre que se projeta produzir no país até 2030 – na ausência de abertura ou expansão de novas minas.

Tem-se como desafio, dessa forma, entender toda a cadeia produtiva dessas tecnologias, de forma a posicioná-la estrategicamente em um plano de desenvolvimento sustentável para o Brasil que pense em uma economia que cresça e gere renda e melhora de indicadores sociais, mas que também vise o posicionamento do país enquanto líder do processo global de descarbonização. Para tal, é de suma importância que o profissional das geociências, no seu âmbito, pense em como aproveitar o significativo potencial mineral brasileiro a fim de levar o país a essa posição de liderança e prosperidade social, ambiental e econômica.

Abstract

The international community has at the center of its debate the measures needed to avoid the worst effects of climate change throughout the rest of the century. In order to achieve these goals, countries create commitments, through which they vow to reduce their greenhouse gas emissions. These commitments – the NDCs (Nationally Determined Contributions, in English) – are regularly reviewed at meetings organized by the United Nations, the so-called Conference of the Parties (COPs). The first NDCs were established within the scope of COP21 in Paris.

To achieve these goals, rapid decarbonization actions that tackle the world economy are needed, a process that begins with the decarbonization of the global energy matrix, since it feeds all other production chains. Thus, it is now a priority to make the extension of installed capacities of renewable energy sources viable in all countries, and Brazil, despite already having a cleaner energy matrix than the global average, is no exception.

These technologies – especially solar panels and wind turbines – despite generating less carbon-intensive energy, carry a high amount of metals and other mineral commodities in their production. Therefore, an opportunity is created for countries with a high mineral potential, such as Brazil to not only supply this raw material to a world that seeks to decarbonize its economy, but also to supply its own process with commodities in abundance and at a lower price.

Thus, the objective of this essay is to assess the Brazil's capacity to achieve its own commitments, established in the Paris Agreement, from the perspective of copper supply. The projections established by the Energy Research Company (EPE, in portuguese) in 2016, after the submission of the first Brazilian NDC, and the installed capacity of solar and wind energy in the country until 2020 were used to reach a volume of copper that would be required to reach this goal. Using copper intensities for the main technologies of solar panels and wind turbines found in literature, a total demand for copper was calculated that is equivalent to approximately 5% of the volume of copper alloy that is projected to be produced in the country by 2030 - in the absence of opening or expansion of new mines or metallurgic sites.

The challenge, therefore, is to understand the entire production chain of these technologies, in order to strategically position it in a sustainable development plan for Brazil one that projects an economy that grows and generates income and improves social indicators, but which also aims at positioning the country as a leader in the global decarbonization process. Therefore, it is extremely important that geoscience professionals, within their scope, think about how to take advantage of the significant Brazilian mineral potential in order to lead the country to this position of leadership and social, environmental and economic prosperity.

Introdução

a) Contextualização das metas estabelecidas no Acordo de Paris

Com a emergência das mudanças climáticas, 190 países se reuniram em Paris na 21ª Conferência das Partes (Globo News, 2015) - para discutir sobre um possível acordo de redução das emissões de GEEs (gases do efeito estufa). As nações participantes foram incitadas a apresentarem suas NDCs (*Nationally Determined Contributions*), referentes ao quanto cada país se compromete a reduzir as suas emissões, a fim de evitar um crescimento da temperatura média da Terra acima de 2 °C até o final do século (Fig. 1).

Em 2021, estes mesmos signatários do Acordo de Paris se reuniram mais uma vez em Glasgow, Escócia, para a COP26. O evento teve como objetivo principal buscar medidas consensuais para definir ações imediatas para o combate à emissão de gases do efeito estufa, bem como conscientizar a comunidade internacional sobre a necessidade de abandonar os combustíveis fósseis (Folha de São Paulo, 2021). Além disso, ao longo dos dias de evento, houve uma série de acordos bilaterais que visavam a criação de metas específicas para a redução das emissões de gás metano (CH₄) – gás potencial de aquecimento global 28 vezes maior que o (GHG Protocol, 2016), associado principalmente ao setor agropecuário, em 30% até 2030, globalmente. Adicionalmente, foi estabelecido um fundo internacional voltado para a extinção do desmatamento ilegal até 2030, tendo os EUA como maior doador até o momento (CartaCapital, 2021).

Quando os limites de temperatura serão alcançados?



Notas: *SSP1-1.9 **SSP5-8.5

Fonte: IPCC.

06.08.2021



WORLD RESOURCES INSTITUTE

Figura 1: Cenários de ação de combate às mudanças climáticas. À esquerda está o cenário de ação climática ambiciosa estabelecido pelo IPCC (2021), em que é evitado o aumento da temperatura média da Terra acima dos 2 °C. À direita, o cenário de alto carbono ocorre se pouca ou nenhuma ação é tomada no combate aos piores efeitos das mudanças climáticas – aqui, o teto de 2 °C é ultrapassado entre 2032 e 2051, chegando a mais de 4 °C de aumento de temperatura média até o final do século XXI. As metas do Acordo de Paris buscam levar o planeta para os cenários projetados na esquerda (World Resources Institute, 2021).

Esses compromissos individuais, formalizados no Acordo de Paris de 2015 (Globo News, 2015), apresentam um grande desafio para os países envolvidos, uma vez que eles implicam em reformas estruturais nas economias locais, regionais e global, além de mudanças culturais na sociedade, sobretudo quanto ao consumo sustentável e a preservação do meio ambiente, garantido o bem-estar das gerações futuras. Para países em desenvolvimento, como o Brasil, o desafio é ainda maior, visto que a descarbonização econômica deverá ocorrer concomitantemente a movimentos de ascensão social, o que implica em aumento acelerado do PIB.

A NDC brasileira atualizada, submetida em 2020, reitera as metas de redução de emissões do Brasil em 37% até 2025, e em 43% até 2030, além de estabelecer uma nova meta de “neutralidade climática” até 2060 (Governo Federal, 2020). Como signatário do Pacto de Glasgow, em 2021, o país se compromete a enviar uma nova NDC até a ocasião da COP27 em 2022, que se realizará no Egito. Neste último encontro na Escócia, o país se comprometeu também a estabelecer metas de redução específicas de gás metano, contribuindo com a meta global de redução nas emissões globais de metano (Época Negócios, 2021). Destaca-se o impacto destes compromissos no setor agropecuário, que é o principal emissor de GEE do país e um impactante emissor de CH₄.

b) A importância do setor elétrico/energético no combate às mudanças climáticas

O combate às mudanças climáticas gera a necessidade de ação rápida no combate a emissão de gases do efeito estufa. Destes, o CO₂ tem a maior contribuição para o aquecimento global, representando 74,4% das emissões totais em *Global Warming Potencial* (GWP) (Climate Watch, 2020; Fig. 2). Em volume, 87% do dióxido de carbono antropogênico emitido na atmosfera provém da queima de combustíveis fósseis para a geração de energia elétrica (ECMWF, 2017).

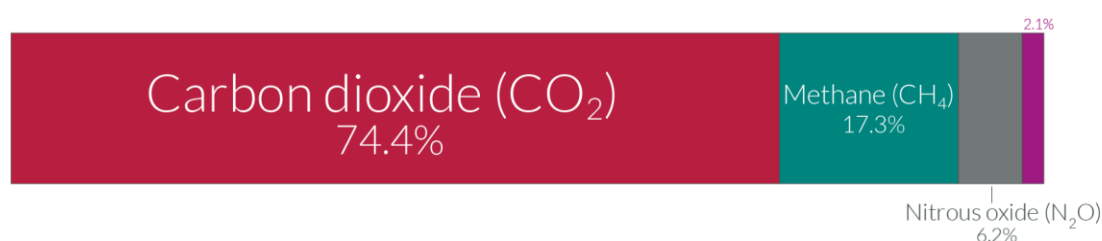


Figura 2: Emissões Globais de Gases do Efeito Estufa por gás, em GWP. Lê-se: Dióxido de Carbono (74,4%), Metano (17,3%), Óxido de Nitrogênio (6,2%) e Gases Fluorados (2,1%) (Climate Watch, 2020).

Adicionalmente, por possibilitar o funcionamento de virtualmente todas as cadeias produtivas, há uma grande participação do setor energético nas emissões globais de gases do efeito estufa. Segundo a ONG Climate Watch (2020), 73,2% das emissões de GEE são provenientes do consumo de energia na indústria, nos transportes e em edifícios, principalmente (Fig. 3).

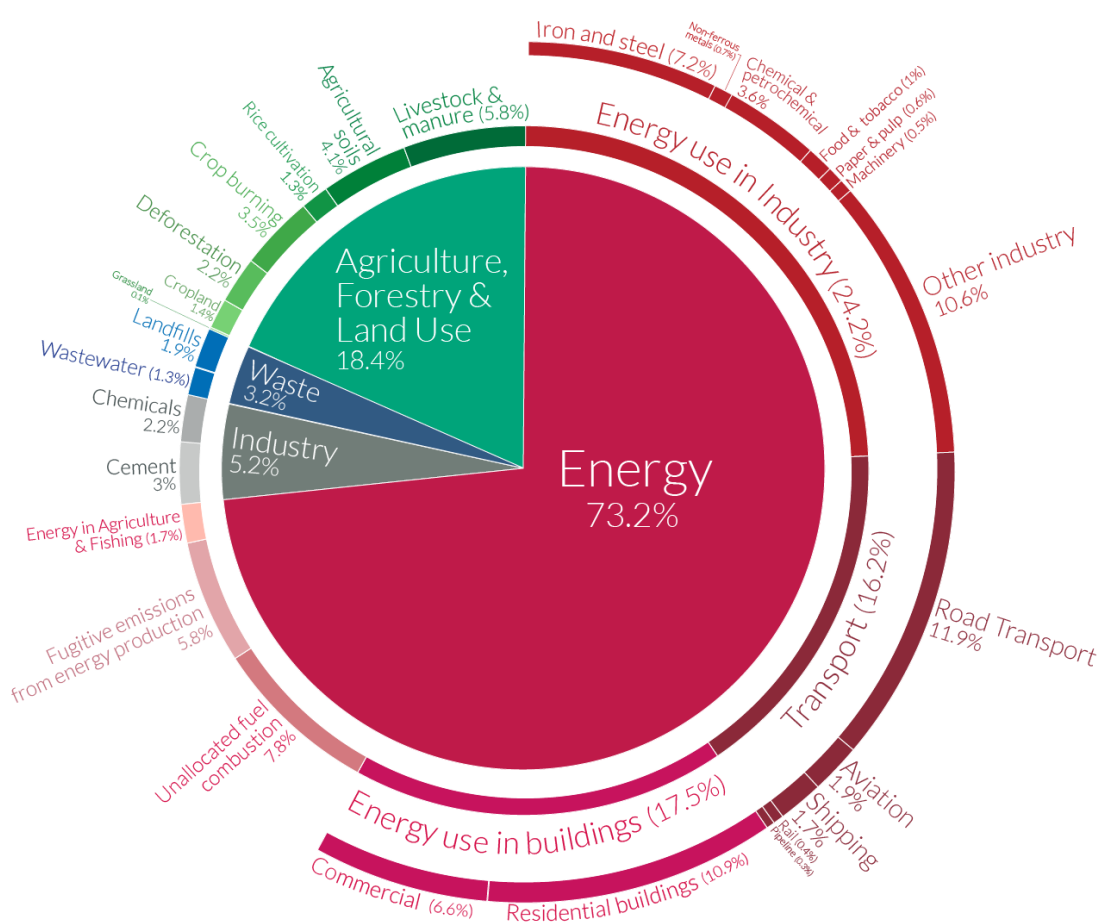


Figura 3: Emissões Globais de Gases do Efeito Estufa por setor. Nota-se que o setor energético é o mais emissor, representando 73,2% das emissões de GEE, em toneladas de CO₂eq, do planeta em 2016 (Climate Watch, 2020).

Dessa forma, torna-se imperativo o esforço conjunto dos países para a implementação de políticas que incentivem os diversos setores econômicos a adotarem práticas e tecnologias que possibilitem a descarbonização dos mesmos. Griffith (2020) detalha no livro “*Rewiring America (2020)*” um caminho para o processo de descarbonização, no contexto dos EUA, com a utilização das tecnologias de geração de eletricidade de baixo carbono – solar, eólica, nuclear e hidrelétrica, todas já disponíveis e com tecnologias maduras:

“No nível mais alto, e correndo o risco de me repetir, qualquer plano realista para a descarbonização total é simples: eletrificar tudo. Quando substituirmos tudo em nossas vidas por [aparelhos movidos a] eletricidade, os carros serão mais rápidos, o ar em nossas cidades, subúrbios e as casas ficarão mais limpos, nossos eletrodomésticos ficarão melhores, as ruas ficarão mais silenciosas, e nossa consciência [acerca da emissão] do carbono ficará limpa. Temos a tecnologia de que precisamos, hoje, para resolver as mudanças climáticas.”

- Saul Griffith em *Rewiring America* (2020)

Fica clara a importância das tecnologias de geração de energia renovável para o desenvolvimento sustentável dos países. Dentre essas tecnologias, é destacada a importância das energias solar e eólica, dado a resiliência e segurança na geração das mesmas. As fontes de energia solar e eólica não estão suscetíveis às variações nos sistemas

hídricos, que já estão sendo intensamente afetados pelas mudanças climáticas e que serão cada vez mais comuns e graves no futuro próximo (IPCC, 2021). Por esses motivos, as energias solar e eólica são mais resilientes que a energia hidroelétrica, por exemplo. Mesmo impactando o meio ambiente para produção de insumos minerais usados para a sua fabricação as usinas solares e eólicas também não apresentam os mesmos desafios de logística de rejeito que se colocam no caso da energia nuclear – esta classe de rejeito pode chegar a precisar de armazenamento especial por até 300 anos (Okuno, 2019).

c) A importância do suprimento de *commodities* minerais para o atingimento das metas brasileiras

Para o Brasil, a análise detalhada das metas de redução de emissões estabelecidas pelo país no âmbito do Acordo de Paris não inclui, nominalmente, o setor elétrico/energético. Isso se deve ao perfil de emissões do Brasil (Fig. 4) que, ao contrário da maioria dos países, tem na agropecuária o seu setor mais emissor. Mas como pode ser notado na figura, o setor de energia no Brasil apresenta significativa contribuição na emissão de GEE, com pouco mais de 25,8% em 2020 (Fig. 4).

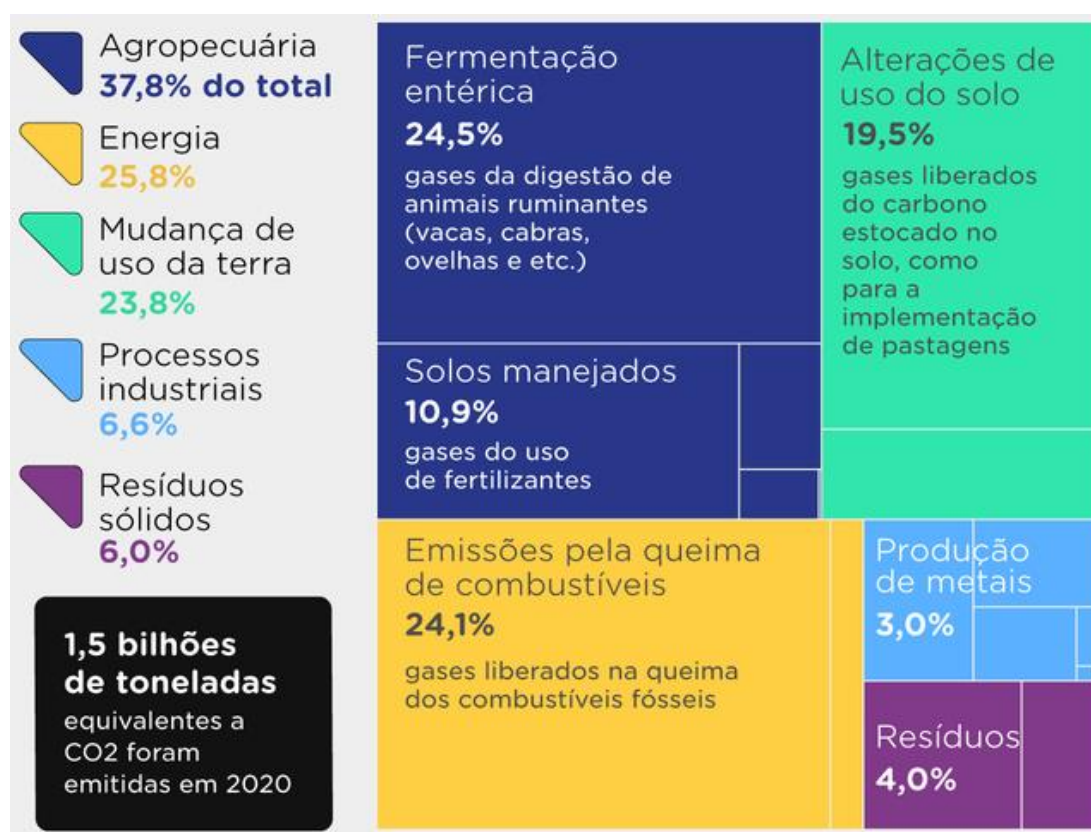


Figura 4: Participação de cada setor no total de gases do efeito estufa emitidos pelo Brasil em 2020 (Nexo, 2021).

Nestes aspectos, o perfil de emissões do Brasil destoa do restante do mundo, que tem como grande desafio descarbonizar o setor energético. Isso se evidencia ao comparar a participação de cada estado brasileiro nas emissões totais do país. Ao contrário do que seria esperado, os estados mais emissores do Brasil não são os mais populosos e industrializados,

como São Paulo e o Rio de Janeiro, mas são os estados do cinturão do desmatamento, no caso o Pará e o Mato Grosso (Brasil em Mapas, 2021; Fig. 5).

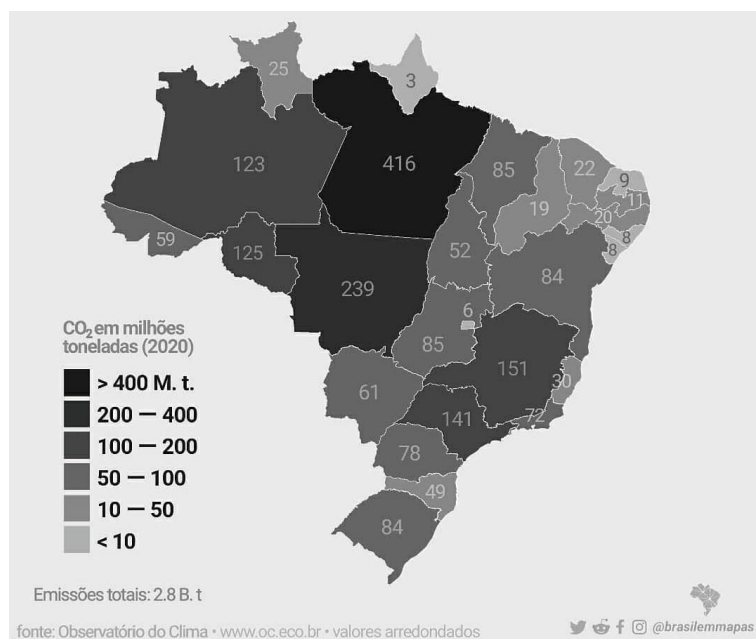


Figura 5: Emissões de gases do efeito estufa, por estado, utilizando dados do Observatório do Clima (2021). Percebe-se que os estados mais emissores do país são aqueles que compõem o cinturão do desmatamento na Amazônia (Brasil em Mapas, 2021).

O documento elaborado pela EPE em 2016 (EPE, 2016), após a submissão dos compromissos do Brasil no Acordo de Paris, deixa clara a dinâmica entre as metas absolutas de redução de emissões e o setor energético brasileiros. Ressalta-se nesse documento:

“O Brasil se destaca por possuir uma matriz energética com grande participação de fontes renováveis, [...]. Isso significa que as emissões de GEE por unidade de energia consumida no Brasil são pequenas comparativamente a outros países.

Por outro lado, se compararmos os indicadores socioeconômicos, percebemos que o Brasil ainda tem um caminho longo a percorrer para atingir padrões de vida comparáveis aos dos países desenvolvidos. Assim, mesmo o Brasil adotando uma trajetória de desenvolvimento menos perdulária e menos intensiva no uso da energia do que a dos países desenvolvidos, desconectando o aumento do consumo de energia do crescimento econômico, é difícil imaginar que o País conseguirá reduzir o nível de pobreza no horizonte até 2030 sem aumentar o consumo de energia per capita. Como resultado, as emissões serão crescentes.

De fato, o grande desafio do setor energético brasileiro é justamente manter elevada a participação de fontes renováveis na sua matriz, o que implica expansão expressiva do parque instalado de usinas eólicas, solares, termelétricas a biomassa e a construção de novas hidrelétricas, [...].”

- O Compromisso do Brasil no Combate às Mudanças Climáticas: Produção e Uso de Energia (EPE, 2016).

Assim, a Empresa de Pesquisa Energética do Brasil estabeleceu uma meta de incremento da capacidade instalada das fontes de energia renovável na matriz elétrica brasileira, respeitando, porém, o compromisso nacional de redução de emissões de gases do efeito estufa (EPE, 2016). As projeções encontradas, seguindo estes parâmetros são as explicitadas na Tabela 1:

Tabela 1: Projeções do Perfil da Matriz Elétrica Brasileira até 2030 (EPE, 2016).

Capacidade Instalada	2005		2014		2025		2030	
	GW	%	GW	%	GW	%	GW	%
Hidro	71	76,5	96	71,8	120 - 127	58,7 - 61,1	139	54,2
Gás Natural	10	10,4	11	8,3	21	10,0 - 10,4	21	8,2
Carvão	1	1,5	3	2,4	3 - 4	1,6 - 1,7	4	1,4
Nuclear	2	2,2	2	1,5	3	1,6 - 1,7	5	2,1
Biomassa	3	3,6	11	8,3	20 - 21	9,7 - 9,9	28	11,0
Eólica	0	0,0	5	3,7	24 - 25	11,4 - 12,1	33	12,9
Solar (centralizada)	0	0,0	0	0,0	7 - 8	3,3 - 3,7	17	6,8
Outros	5	5,8	5	4,0	0 - 2	0,0 - 1,1	0	0,0
Total SIN	93	100	133	100	197 - 207	99,1	248	96,5
Geração Distribuída								
Biogás	0	0,0	0	0,0	0	0,0	1	0,3
Solar	0	0,0	0	0,0	2	0,9 - 1,0	8	3,2
Total (SIN + GD)	93	100	133	100	199 - 209	100	257	100

Para que o Brasil cumpra as suas metas estabelecidas na COP21, com as alterações introduzidas na COP26, e desdobradas em EPE (2016), se fará necessário desenvolver a infraestrutura solar e eólica brasileira, principalmente na forma de painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas. Mudanças em infraestrutura geram tensões de demanda por determinadas *commodities* que são utilizadas em maior volume nas novas tecnologias empregadas (Manberger, 2018; IEA, 2021).

Países como o Brasil, com vasto potencial mineral ainda relativamente inexplorado, têm, neste cenário de descarbonização da economia, a oportunidade de se preparar para modernizar as suas matrizes energéticas através de matéria prima produzida nacionalmente. Os desafios provocados pelas mudanças climáticas fornecem, também, uma janela de oportunidades para que o país se torne *player* relevante nas cadeias de produção de tecnologias que serão cada vez mais relevantes para a economia do futuro, visto que serão elas que possibilitam o atingimento dos compromissos de redução de emissões dos países ao redor do mundo. Dessa forma, o presente trabalho tem os seguintes objetivos:

- 1) Projetar a demanda total de cobre proveniente da produção de painéis solares fotovoltaicos e turbinas eólicas em quantidade suficiente para o atingimento da meta brasileira de diversificação das fontes renováveis de geração de energia na matriz elétrica brasileira. Nesta estimativa não será incluída a necessidade de expansão das redes de transmissão de energia;
- 2) Avaliar a capacidade que o Brasil tem de, com a capacidade presente de produção, suprir a demanda interna de cobre para a expansão dos sistemas de geração elétrica fotovoltaica e eólica, considerando os destinos atuais da produção nacional e;

- 3) Discutir alternativas, em termos de exploração e exploração de cobre no território nacional, para um melhor posicionamento do país em relação ao suprimento dessa *commodity*.

1. Como funcionam as tecnologias geradoras de energia solar e eólica?

a) Funcionamento dos painéis solares

A Terra recebe diariamente aproximadamente 173 mil TW de energia solar continuamente – 10 mil vezes mais do que o que é consumido pela população do planeta (MIT News, 2011). Os painéis solares são tecnologias desenvolvidas com o objetivo de captar parte dessa energia e transformá-la em energia elétrica. Por depender da luz do sol, a energia gerada através destes aparelhos é chamada de energia solar fotovoltaica.

Os painéis solares são formados por um conjunto de células solares (Fig. 6), um dispositivo formado por dois tipos de silício (um “N”, com excesso de elétrons, e outro “P”, com escassez de elétrons) “sanduichados” entre outras duas camadas condutoras.

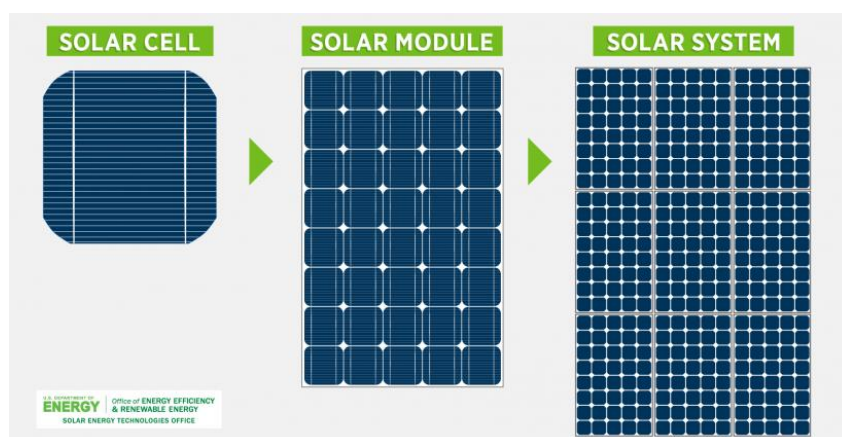


Figura 6: Esquema de montagem dos painéis com células solares montadas em placas (ou módulos) solares. A junção de vários módulos solares fotovoltaicos forma um sistema de energia solar, concebido para atender às diferentes necessidades de geração de energia elétrica (US Energy Department, 2021).

O fenômeno que permite a geração de eletricidade a partir da energia solar se chama efeito fotovoltaico. A energia é gerada quando os raios solares (fótons) atingem a superfície de silício, fazendo com que parte dos elétrons que circundam os átomos do semimetal se desprendam, gerando um excesso de elétrons livres na parte “N” da célula. Na intersecção entre os dois tipos de silício, forma-se um campo elétrico chamado de junção “P/N”, que gera uma diferença de carga entre as duas camadas de silício. Devido à diferença de cargas, os elétrons são conduzidos para o silício “P”, que possui um excesso de lacunas nos átomos de silício. Dessa forma, ao longo do dia, cria-se um fluxo constante de elétrons, gerando uma corrente elétrica que é captada como energia elétrica (Fig. 7).

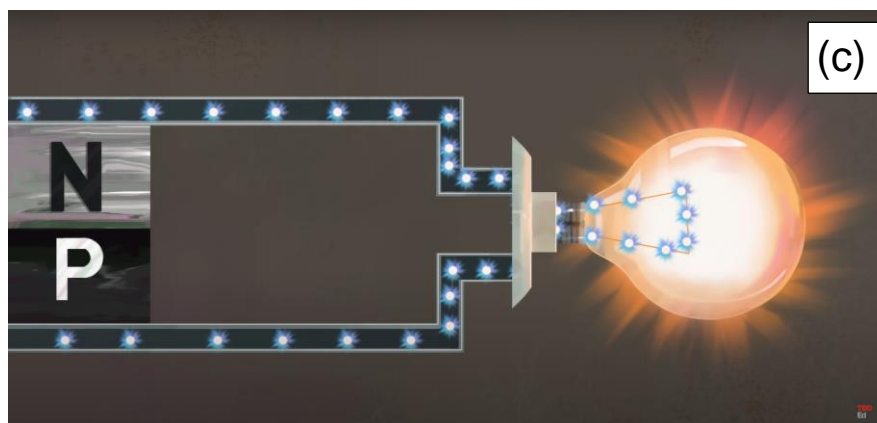


Figura 7: Ilustração do processo de geração de energia elétrica em uma célula solar fotovoltaica. (a) as células solares são formadas por duas camadas de silício - uma “N”, com excesso de elétrons, e outra “P”, com excesso de lacunas nos átomos de silício. (b) um campo elétrico é gerado na intersecção entre os dois tipos de silício, chamado de junção “P/N”, criando uma carga positiva no silício “P” e outra negativa no “N”. (c) o campo elétrico segrega os elétrons deslocados pelo impacto dos fótons para a extremidade negativa da célula, forçando os mesmos a seguirem um fluxo único até a extremidade positiva, que concentra as lacunas nos átomos de silício. Dessa forma, gera-se uma corrente elétrica que pode ser captada por um circuito e utilizada (Komp, 2016).

Os dois principais tipos de painéis solares disponíveis no mercado atualmente são os painéis solares de **silício cristalino**, que compõem aproximadamente 90% do mercado, e os

de **filme fino** (Manberger, 2018). Os painéis de silício cristalino utilizam mais material na sua fabricação, devido à maior espessura (aprox. 180 μm) e são divididos em outros dois subtipos a depender da estrutura na qual o silício se encontra na célula fotovoltaica: i) **policristalinos**, formados por células que utilizam vários cristais de silício fundidos em uma única peça e ii) **monocristalinos**, energeticamente mais eficientes, com células formadas por um único cristal de silício. Devido à maior maturidade de mercado, as tecnologias de silício cristalino já possuem inovações amplamente disponíveis, garantindo maior eficiência e versatilidade nas aplicações destas. Atualmente, existem, dentro deste subgrupo, os chamados painéis **Mono Percs** – painéis mais avançados com células fotovoltaicas de menor espessura; e os painéis **bifaciais**, que utilizam o efeito de albedo para geração de energia elétrica.

Os painéis de filme fino, comumente chamados de módulos fotovoltaicos de segunda geração, são painéis delgados que utilizam tecnologias sofisticadas de deposição de material sobre um substrato metálico. Este processo garante menor espessura e menor custo na produção. Contudo, os painéis de filme fino ainda possuem eficiência média de até 35%, menor que os painéis cristalinos disponíveis no mercado (PortalSolar, 2014). Os subtipos de painéis de filme fino são divididos conforme o tipo de material que é depositado sob o substrato em questão, sendo os mais comuns os painéis de silício amorfo, de telureto de cádmio (CdTe) e os de seleneto de cobre, índio e gálio (CIGS). Os dois últimos são os mais difundidos no mercado. A Figura 8 ilustra as principais variedades de tecnologias de módulos fotovoltaicos disponíveis no mercado.

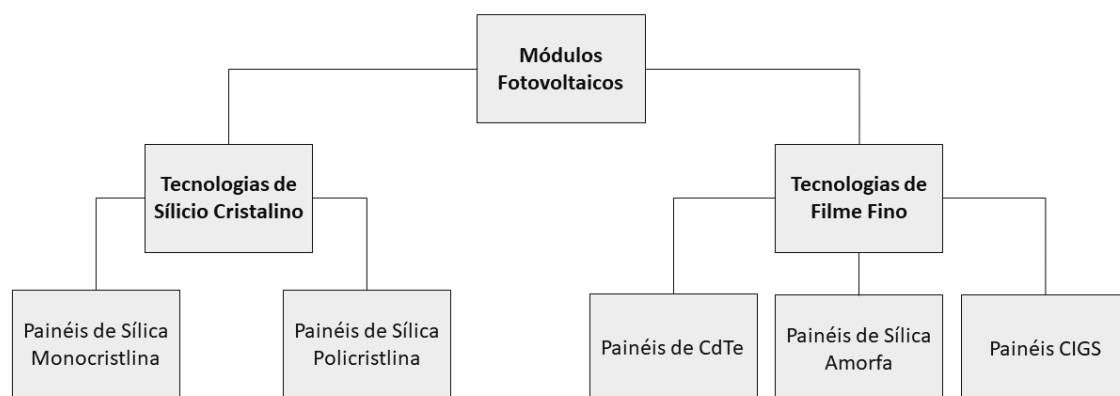


Figura 8: Ilustração das principais variedades de tecnologias de módulos fotovoltaicos encontrados no mercado atualmente, baseado em Manberger (2018).

Ambos os tipos de painéis solares necessitam de importantes quantidades de silício e de outros metais na sua fabricação. Destaca-se o uso da prata nos painéis solares cristalinos, sendo necessárias aproximadamente 20 tAg/GW, visto que o metal compõe as camadas condutoras entre as quais se encontra a placa de silício “P/N” (Manberger, 2018; S&P Global, 2020). O cobre é utilizado para conectar as células solares umas às outras, além de servir como receptor do fluxo de elétrons que é gerado (Fig. 9). O cobre também é utilizado nos fios elétricos dos painéis solares e para conectá-los à rede de distribuição ou a sistemas de acumulação.

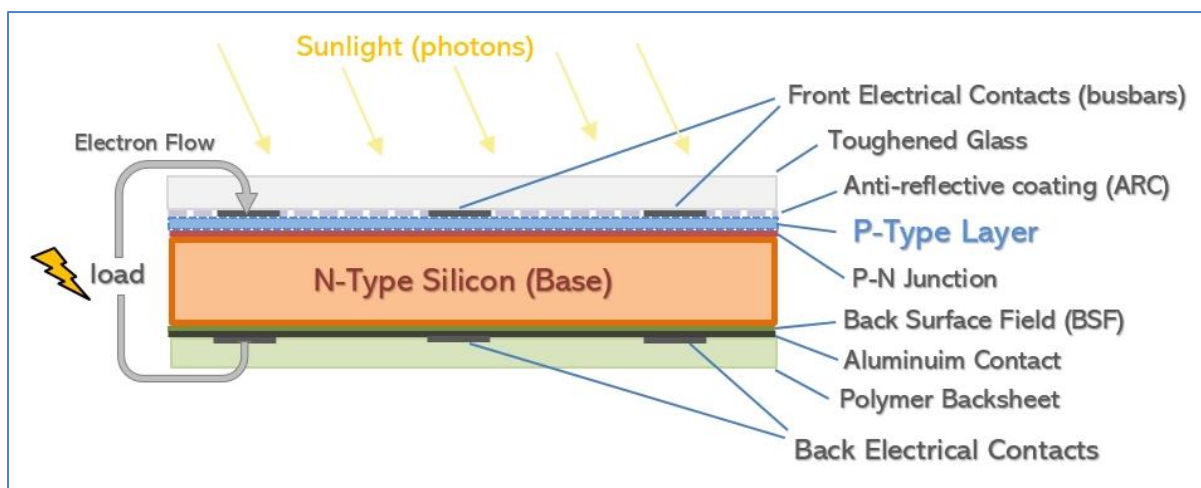


Figura 9: Ilustração dos componentes básicos de uma célula solar fotovoltaica de silício cristalino, onde pode-se notar os contatos elétricos frontais e traseiros, manufacturados com ligas de cobre (na imagem, em inglês, Front e Back Electrical Contacts) (Clean Energy Reviews, 2021).

b) Funcionamento das turbinas eólicas

Dos barcos à vela até os moinhos de vento utilizados para bombear água e moer grãos, a energia provida pelos ventos vem sendo utilizada pela humanidade há milênios. Atualmente, o mercado tem o desafio de otimizar a geração de eletricidade a partir da energia eólica, a fim de superar a sua dependência nos combustíveis fósseis. Neste caso, a engenharia das turbinas eólicas é o maior desafio, visto que as mesmas precisam ser projetadas para gerar a maior quantidade possível de energia, bem como suportar as diferentes condições de estresse físico às quais são submetidas na sua operação. Adicionalmente, é também um desafio a identificação dos locais apropriados, com ventos em intensidade e frequência adequadas para instalação das fazendas eólicas e para conexão à rede de distribuição.

O preceito por trás da geração de eletricidade eólica é simples: as hélices das turbinas são movidas pela força dos ventos, girando um rotor que é ligado ao gerador que converte essa energia cinética em energia elétrica (Fig. 10).

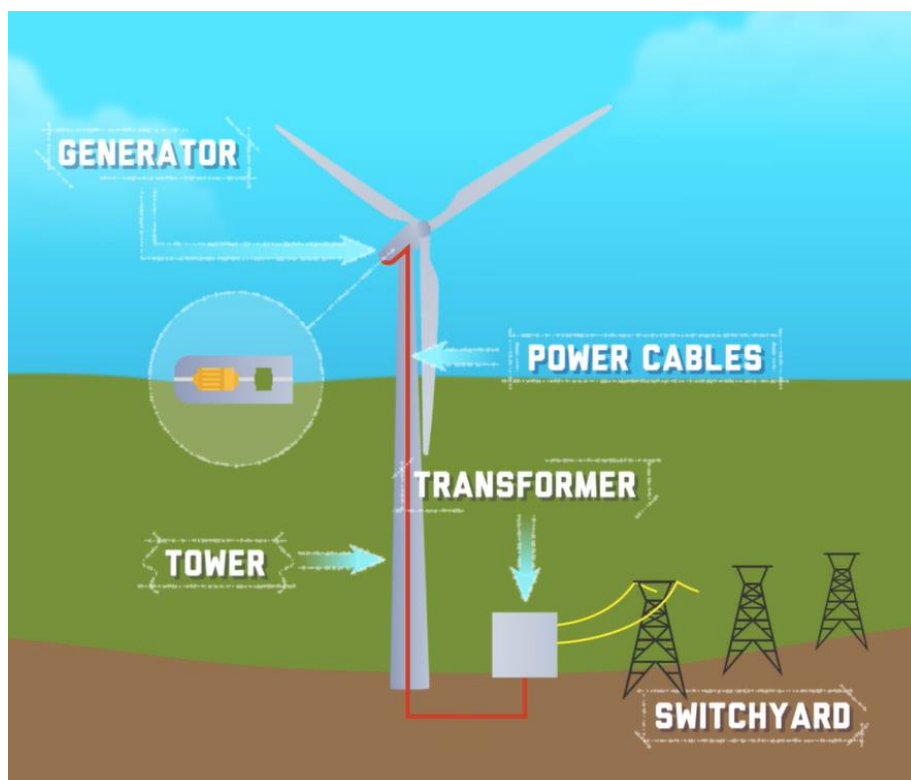


Figura 10: Esquema ilustrativo do funcionamento de uma turbina eólica (CrashCourse, 2019).

De forma geral, pode-se separar as turbinas eólicas em dois grupos principais, a depender de onde as mesmas estão instaladas. As turbinas *onshore* são instaladas no continente e normalmente possuem dois *shafts* principais – um lento, conectado ao rotor, e outro mais rápido, conectado ao gerador. Este, por sua vez, se utiliza de rolamentos de cobre girando em torno de um campo eletromagnético para gerar eletricidade. Dessa forma, é necessário um mecanismo chamado *gearbox* (Fig. 11) que conecte ambos os eixos e que garanta a aceleração da velocidade de rotação no contato entre eles (o gerador, normalmente sem ímãs permanentes, precisa de maior velocidade para gerar eletricidade).

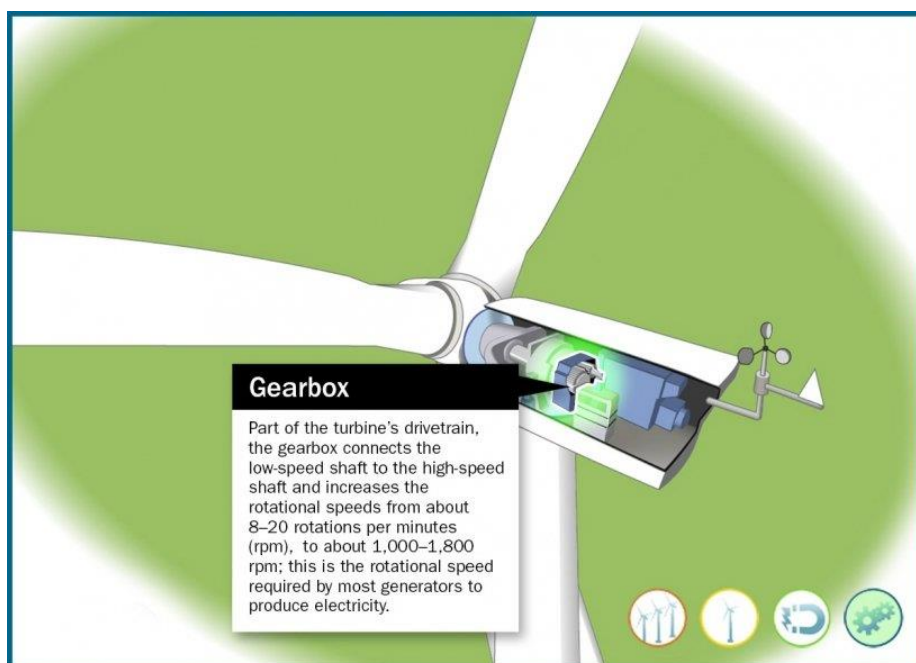


Figura 11: Esquema ilustrativo das turbinas eólicas onshore. Essas turbinas instaladas no continente, em sua maior parte, possuem a tecnologia de gearbox, a qual possibilita aumentar a velocidade rotacional do shaft ligado às hélices da turbina para que o mesmo gire rápido o suficiente para que o gerador possa produzir eletricidade (velocidade mínima entre 1.000 e 1.800 rpm) (US Department of Energy, 2021).

As turbinas *offshore*, por sua vez, devido à altura e distância da costa, precisam funcionar com maior independência da manutenção. Essas turbinas não possuem gearbox – há apenas um *shaft* que conecta as hélices ao gerador que precisa de ímãs permanentes de terras raras, que possibilitam a geração de eletricidade em menor velocidade do *shaft* (Fig. 12).

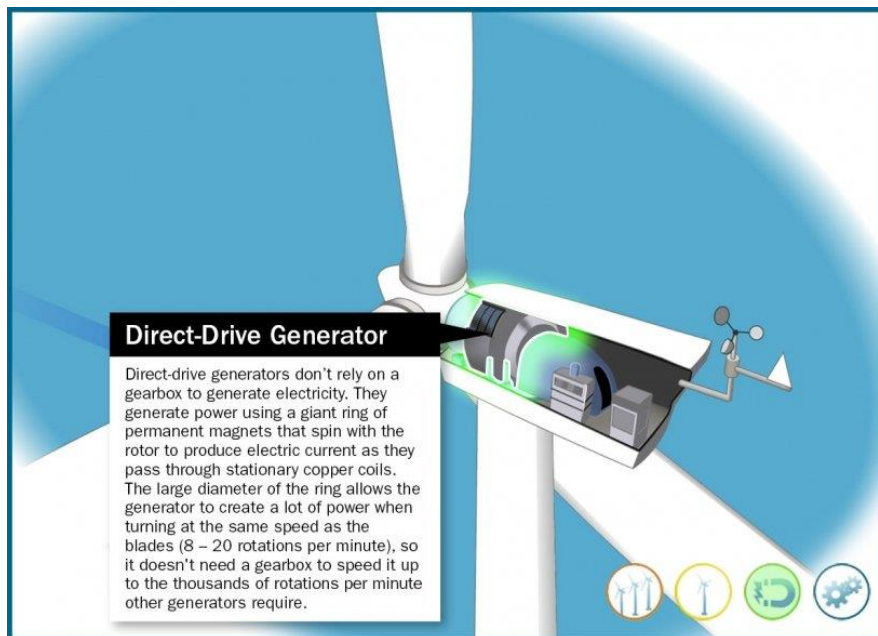


Figura 12: As turbinas instaladas em alto mar (offshore) utilizam geradores de drive direto, que possuem um anel de ímãs permanentes que gira junto com o rotor principal da turbina, gerando corrente elétrica quando os mesmos passam através de bobinas de cobre estacionárias. O diâmetro deste anel permite grande produção de eletricidade, apesar da baixa velocidade de rotação do shaft principal (US Department of Energy, 2021).

Os ímãs são as partes de ambos os tipos de turbina mais intensas no uso de materiais metálicos. Ambos os ímãs permanentes e não permanentes são feitos essencialmente por ligas metálicas, como ferro, cobre e boro (Manberger, 2018) ou aço, cobre, boro, neodímio e disprósio, além de cobre para fiação (Lacal-Arantequi, 2015; Alves-Dias et al., 2020). Os ímãs permanentes com terras raras melhoram a coercitividade e a performance em temperaturas mais altas (Manberger, 2018).

2. Como funcionam as cadeias produtivas das tecnologias estudadas?

Para entendimento das cadeias produtivas de ambas as tecnologias estudadas, é necessário, inicialmente, identificar quais são os principais materiais que as compõem. Obviamente, todas essas tecnologias dependem fortemente de diversos insumos derivados da mineração, responsáveis pela produção de metais de base para fabricação das estruturas que as comportam. Porém, como já pontuado, conforme as tecnologias de geração de eletricidade vão avançando, exige-se uma maior disponibilidade de metais comuns, de base e preciosos, além dos semimetais e metais mais raros, como as terras raras usadas em geradores com ímãs permanentes. Complementarmente, a transição para economia de baixo carbono tem demandado aumento significativo na produção dos insumos minerais (IEA, 2021), que para sua produção necessitam de uso intensivo de energia, tornando ainda mais imperativa a produção de energia limpa.

Neste trabalho, a análise da cadeia produtiva das tecnologias estudadas seguirá o racional utilizado pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) para avaliar o papel das *commodities* minerais na economia americana. A cadeia produtiva da indústria mineral norte americana e sua importância na economia do país pode ser vista na Figura 11 (USGS, 2021), que inclui dados sobre o papel da reciclagem. O foco deste trabalho é entender as

características da exploração e produção do cobre, como um dos componentes do início da cadeia produtiva dos módulos solares e turbinas eólicas no Brasil. A partir daí, são analisados os processos de refino do minério de cobre e, em seguida, o *status* da fabricação desses produtos no país, sempre avaliando a representatividade da importação em todas estas etapas.

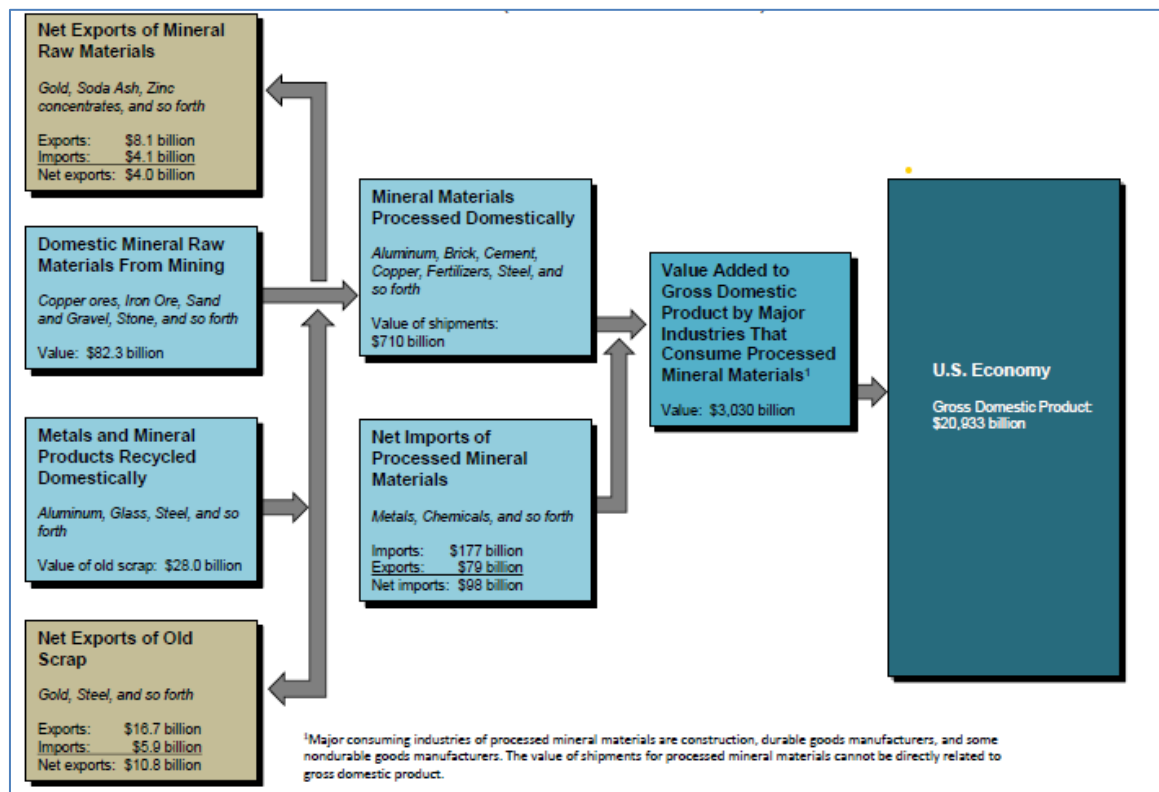


Figura 11: Fluxograma da cadeia produtiva da indústria dos bens minerais não-energéticos dos Estados Unidos e sua importância econômica, com valores estimados para 2020 (USGS, 2021).

a) Depósitos de cobre no Brasil

O Brasil é historicamente importador de cobre, apesar das reservas importantes do país, que representam 1,6% das reservas mundiais (ANM, 2020). Contudo, o país vem apresentando crescimento de produção e um superávit comercial do metal, sustentado pela exportação de concentrado de cobre, do qual o país é um dos maiores produtores (Fig. 12). Esse crescimento se dá principalmente em função do início da produção na mina de Salobo, no Pará.

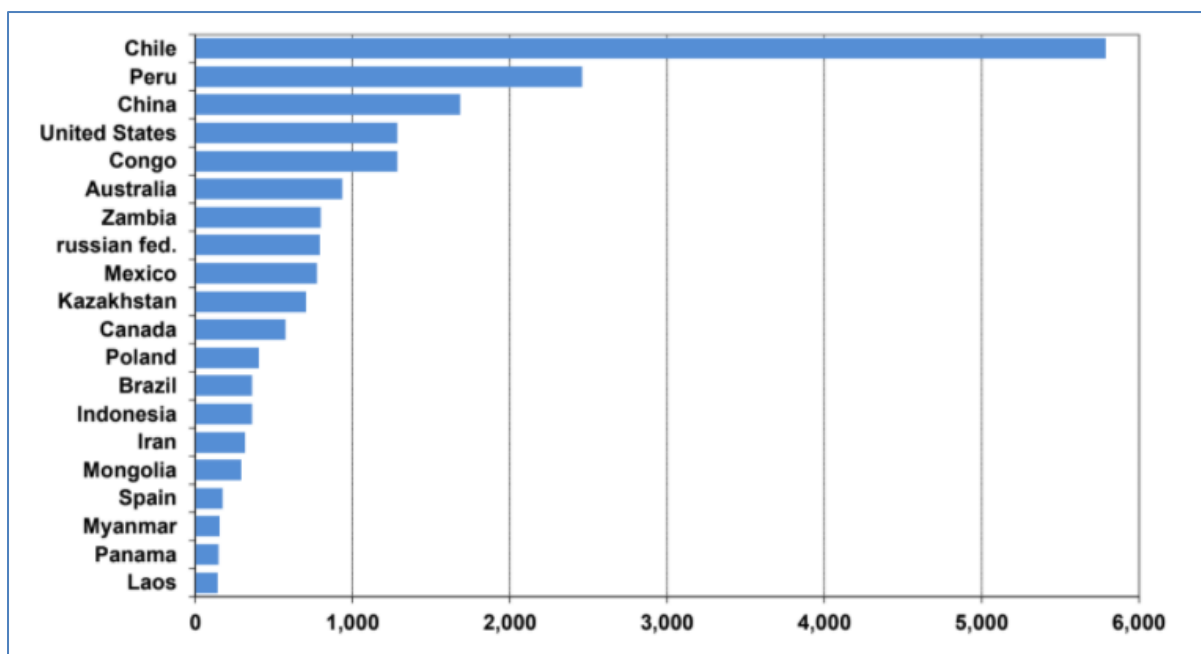


Figura 12: Principais produtores de cobre por país em 2019 (em milhares de toneladas), dentre os quais destaca-se o Chile, que produziu cerca de um terço do cobre no mundo naquele ano, seguido pelo Peru e da China (ICSG, 2020).

Globalmente, a produção de minério de cobre total em 2020 foi de aproximadamente 20 milhões de toneladas de cobre – no mesmo ano, os maiores produtores foram o Chile, o Peru e a China (USGS, 2021) com respectivamente 5,7 mt, 2,3 mt e 1,7 mt produzidas, o que corresponde cerca de 48,5% do minério de cobre do mundo naquele ano. A grande maioria dos depósitos em exploração são do tipo pórfiro (Rocio et al., 2012), associados a intrusões ígneas félsicas geradas em zonas de subducção.

O Brasil, por sua vez, tem a maior parte da produção de cobre concentrada na Província Mineral de Carajás, no Pará, fazendo com que o perfil metalogenético das reservas brasileiras seja consideravelmente divergente do perfil global (Fig. 13). A Província destaca-se por apresentar uma grande quantidade de depósitos do tipo *Iron Oxide–Copper–Gold* (IOCG) – depósitos caracterizados pela deposição hidrotermal de óxidos de ferro com ouro e cobre associados (Juliani et al., 2016). Estudos mais recentes têm sugerido grande potencial para ocorrência de mineralizações de cobre e ouro do tipo pórfiro em unidades magmáticas paleoproterozoicas nas províncias minerais do Tapajós e do Juruena (Juliani et al., 2014; 2016; 2021; Bettencourt et al., 2016) que, caso se confirmem, poderão, no futuro aumentar muito a produção brasileira de cobre.

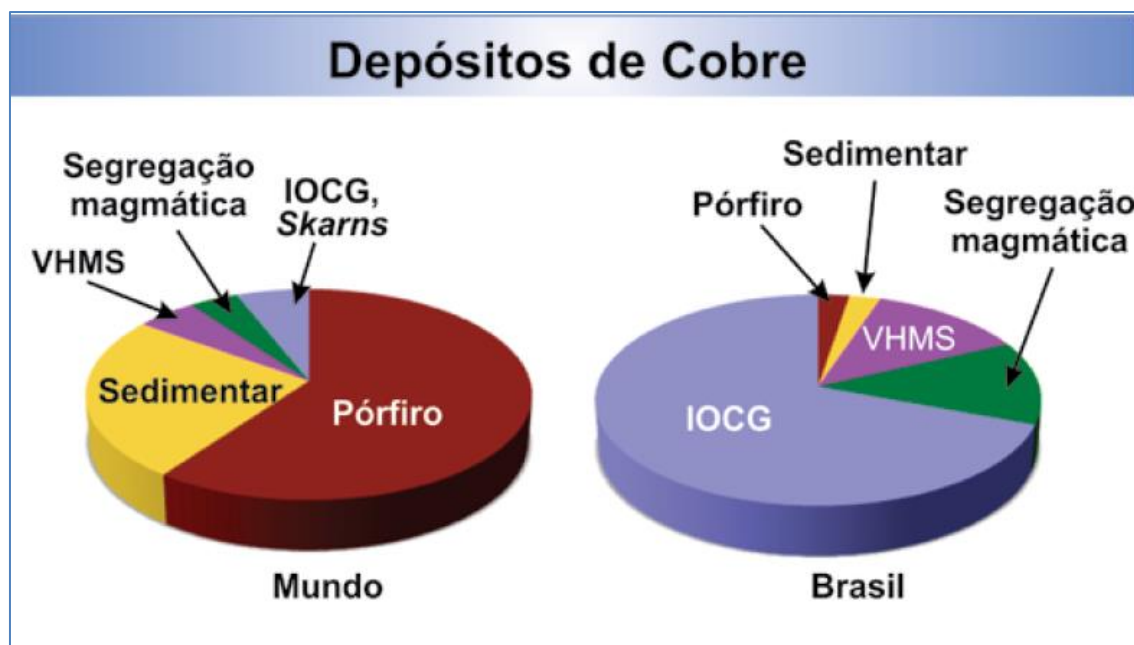


Figura 13: Perfil metalogenético dos depósitos de cobre mundiais e do Brasil de acordo com as principais classes minerais. As minas de Salobo e Sossego, na Província Mineral de Carajás (PA), são do tipo IOCG e fazem com que o perfil brasileiro divirja consideravelmente do perfil global de depósitos de cobre (Juliani et al., 2016).

Atualmente, a maior parte do minério de cobre no país é produzida pela empresa VALE S.A., ou por empresas do grupo (ANM, 2020). Ao todo, o país tem oito minas em operação, sendo quatro delas consideradas grandes, isto é, com quatro usinas de capacidade de produção bruta anual maior que 1 milhão de toneladas de minério (ANM, 2020). Entre 2015 e 2020, a produção bruta média foi de aproximadamente 595 mil toneladas de cobre, sendo o pico da produção em 2018 (ANM, 2016; 2017; 2018; 2019; 2020 e 2021). A produção nacional subiu consideravelmente após a instalação da mina de Salobo em 2011, ano no qual a produção brasileira foi de aproximadamente 205 mil toneladas de cobre (Rocio et al., 2012). Em 2020, a produção foi de 554 mil toneladas, uma queda de 5,1% em relação a 2019 (Fig. 14).

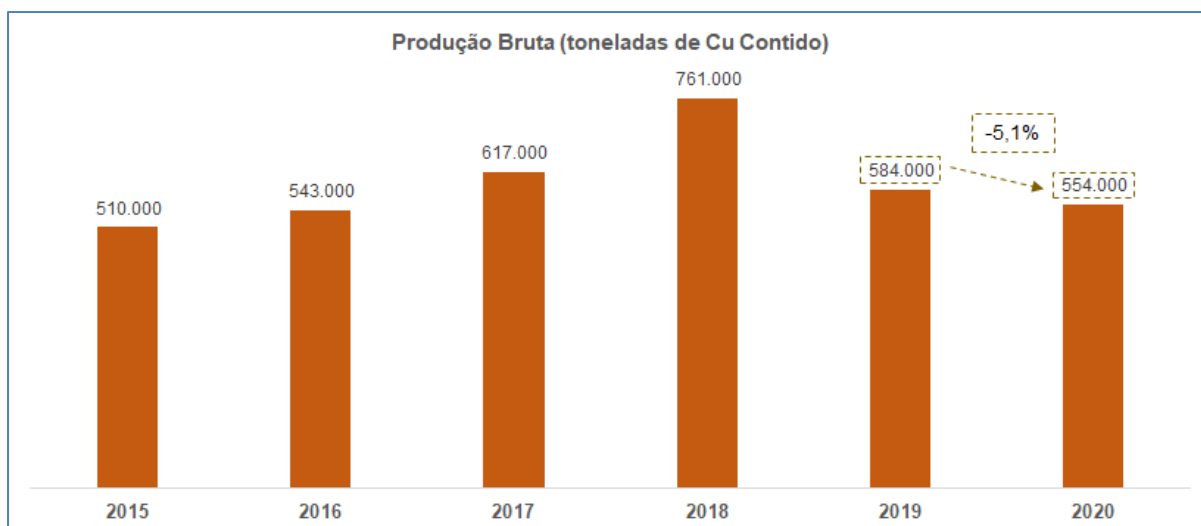


Figura 14: Produção bruta de cobre no Brasil em toneladas de metal contido entre 2015 e 2020 (ANM, 2021).

Na cadeia produtiva internacional do cobre, o Brasil se destaca como fornecedor de minério de cobre, comercializado essencialmente como concentrado. Em 2019, a balança comercial para produtos básicos de cobre (minério e concentrado do metal) apresentou saldo positivo de aproximadamente 1,58 bilhão de dólares (ANM, 2020). Em volume, o Brasil exportou 1,15 milhão de toneladas do produto e importou cerca de 302 mil toneladas (COMEXSTAT, 2021).

Nota-se que com o início da produção da mina de Salobo, operada pela VALE S.A, o Brasil vem aumentando a exportação de concentrado de cobre exportado desde o começo dos anos 2010, dobrando a tonelagem vendida entre 2010 e 2020. Adicionalmente, percebe-se que o volume de minério importado vem diminuindo desde 2015 (Fig. 15), o que parece indicar aumento da produção de cobre metálico no Brasil, ou redução de consumo devido à redução da atividade econômica.

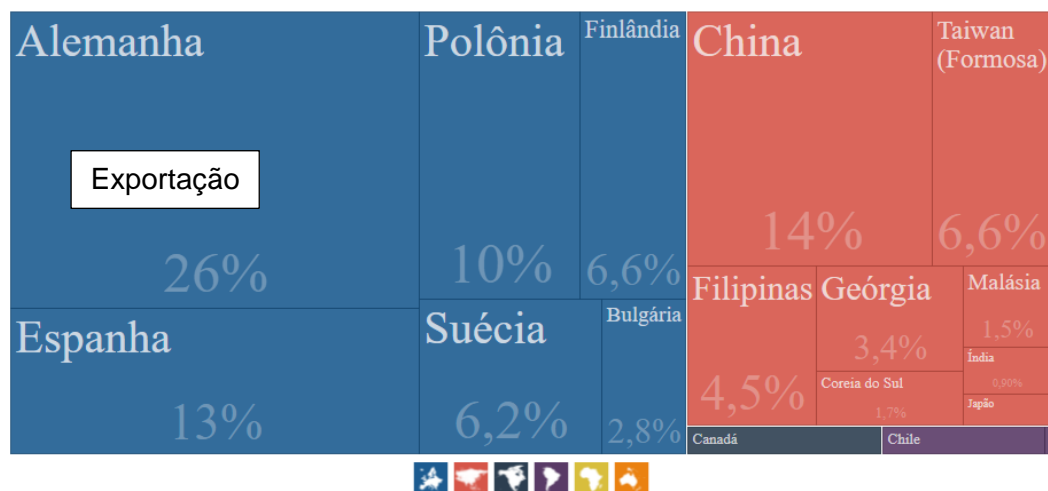
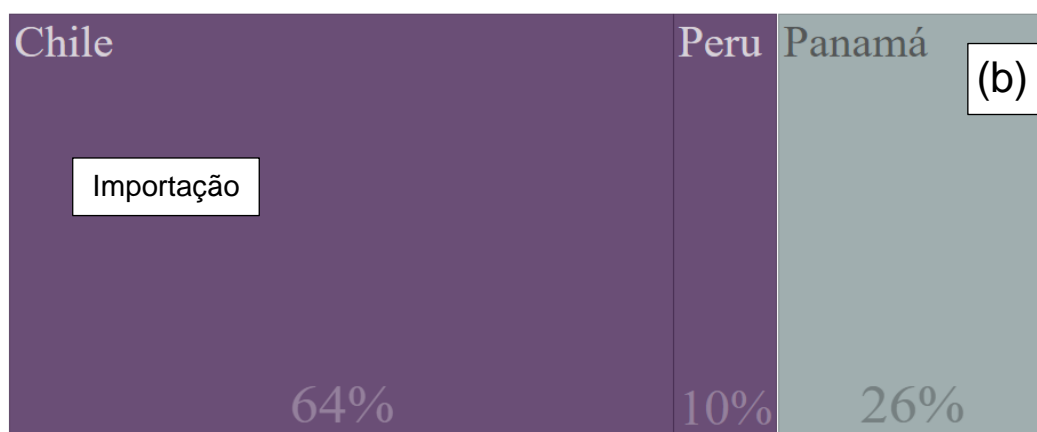
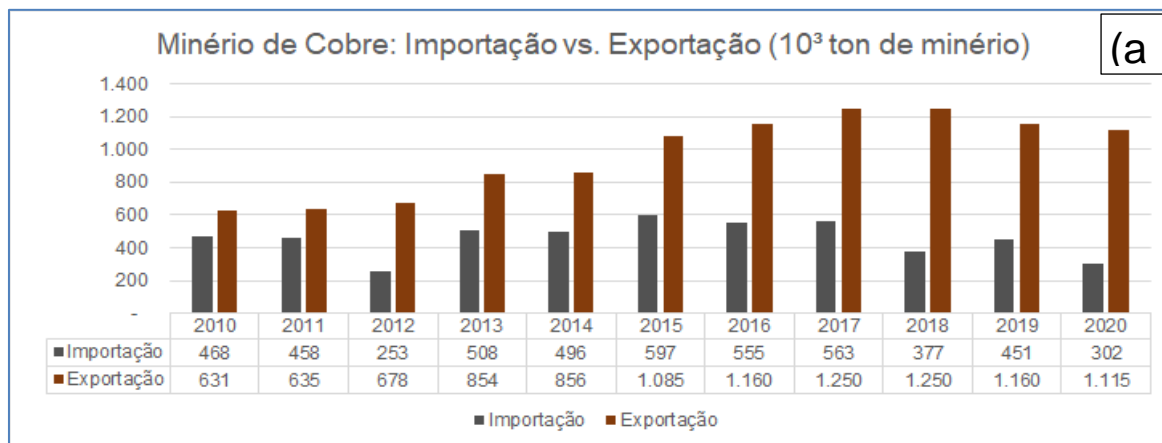


Figura 15: (a) Dados de exportação e importação de minério de cobre, em mil toneladas, no Brasil em 2020. Nota-se que a escalada na exportação da commodity coincide com a instalação da mina de Salobo, da VALE S.A. Os dados de importação mostram uma queda que tem início em 2015, porém, é mais provável que essa seja devido à desaceleração econômica do país do que a uma maior autossuficiência do mercado interno. (b) distribuição dos principais destinos de importação (acima) e exportação (abaixo) de minério de cobre pelo país no ano de 2020. O Chile destaca-se como grande exportador da commodity para o país, enquanto as exportações brasileiras abastecem principalmente grandes produtores de cobre refinado na Europa e na Ásia, com destaque para a Alemanha e a China (COMEXSTAT, 2021).

b) Cobre metálico

Uma vez passado pelo processo de beneficiamento que transforma o minério de cobre em concentrado, este pode passar por duas rotas de refino que têm como produto final o cobre refinado. A primeira se trata do processo pirometalúrgico, ideal para concentrados de cobre produzidos a partir de minérios de cobre sulfetados. Uma outra alternativa de processo de refino é o processo hidrometalúrgico, utilizado para minérios oxidados de baixo teor.

O processo pirometalúrgico (Fig. 16) envolve o tratamento do minério de cobre em forno *flash*. Nele, o metal é separado do sulfato devido às altas temperaturas, fundindo o concentrado. Após um processo de secagem que facilita a manipulação do material e diminui a demanda de energia para a fusão dele, o minério é armazenado em silos e levado ao forno. Após a fusão, separa-se o líquido mais denso pela parte inferior do forno – este líquido é chamado de mate e contém entre 45 e 60% de cobre (Andrade et al., 1997). O processo finaliza com o mate enviado a um forno conversor, de onde se obtém o chamado *blister*, que chega a 98,5% de cobre em concentração (Andrade et al., 1997).

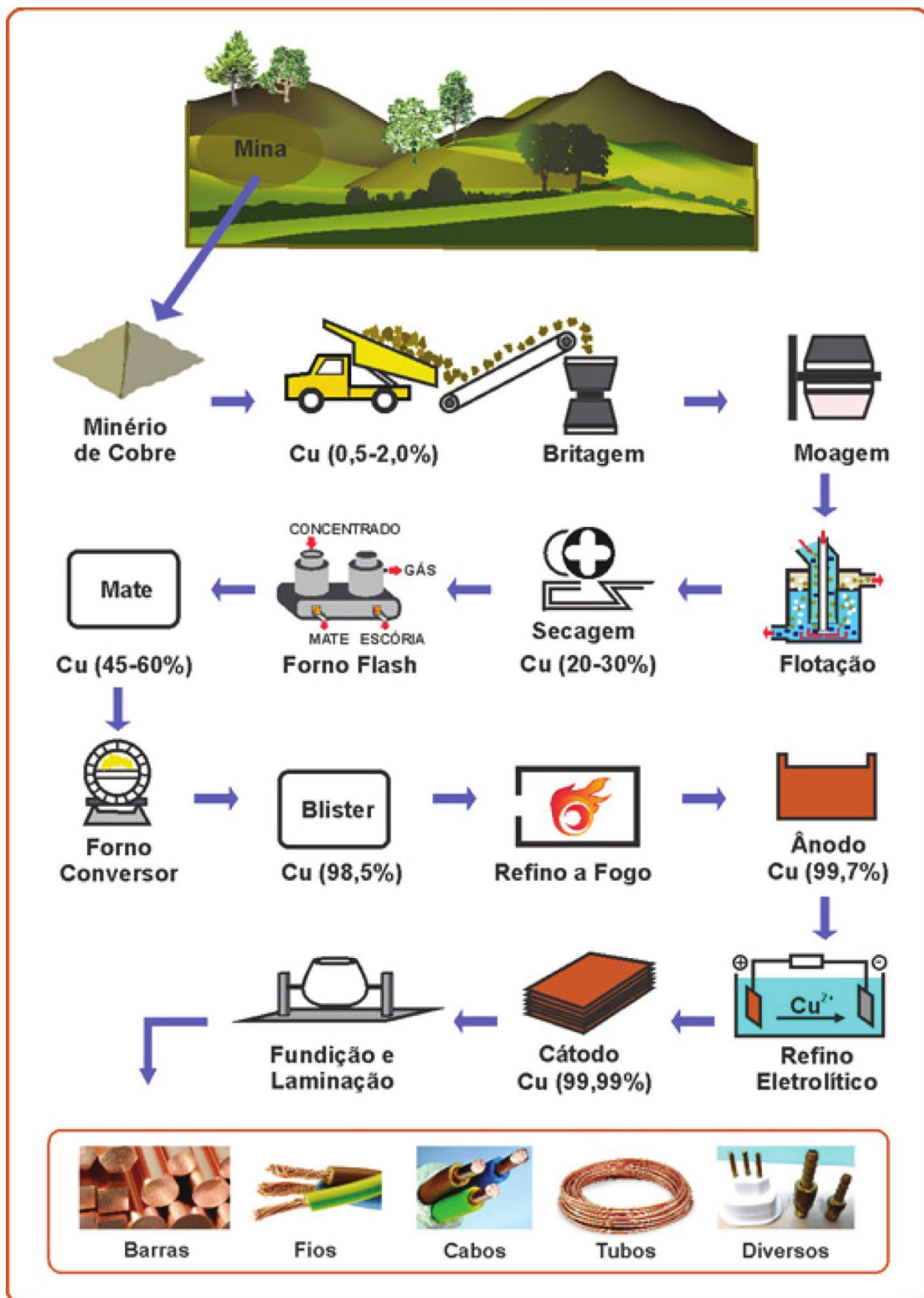


Figura 16: esquematização do fluxo para a obtenção do cobre metálico a partir do minério. Após as etapas de beneficiamento e refino do cobre, obtém-se o blister que pode receber uma série de outros processamentos para produção dos diferentes produtos de cobre (Silva et al., 2019).

A hidrometalurgia necessita de uma etapa adicional no processo de beneficiamento do minério, em que ele é aquecido na presença de oxigênio para o aumento do teor de cobre. Subsequentemente neste processo, o concentrado obtido é lixiviado com solventes (geralmente ácido sulfúrico) para a obtenção de soluções ricas em cobre. A mesma é, em seguida, filtrada e o metal é precipitado através de processos de concentração por eletroredução.

A indústria do cobre tende fortemente à verticalização das suas etapas devido a questões técnicas e econômicas. Quando não totalmente verticalizadas, as etapas de mineração e concentração e as de fundição, refino e laminação estão normalmente interligadas (Ribeiro, 2001).

No Brasil, a única empresa no país que processa o minério de cobre em cobre metálico é a Caraíba Metais S.A, da Paranapanema S.A (Silva et al., 2019), utilizando o método de pirometalurgia. A matriz localiza-se no município de Dias D'Ávila (BA) e faz parte do Polo Industrial de Camaçari, sendo o concentrado de cobre recebido no Porto de Aratu. Em 2018, a empresa produziu cerca de 147 mil toneladas de cobre primário, um aumento de 3% em comparação ao ano anterior (Fig. 17) (Paranapanema S.A., 2019).

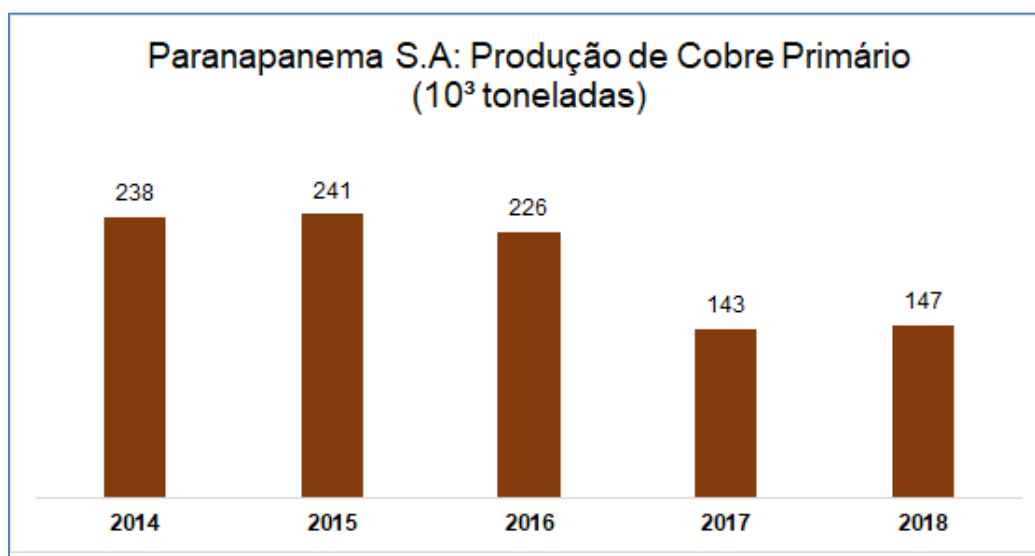


Figura 17: Evolução da produção de cobre pela empresa Paranapanema S.A., a única produtora de cobre metálico no Brasil. O gráfico evidencia uma queda acentuada na produção desde 2015 (Paranapanema S.A., 2019).

O mercado de cobre metálico mundial tem um número maior de *players* relevantes, quando comparado aos maiores produtores do minério (Fig. 18). O Chile, a Rússia e a República Democrática do Congo se destacam como os maiores exportadores, seguidos do Japão e da Austrália (Observatory of Economic Complexity, 2019). Os maiores mercados importadores do cobre refinado são a China, responsável por mais de um terço das importações em 2019, e os Estados Unidos, seguido da Alemanha, Itália e Holanda (Observatory of Economic Complexity, 2019).

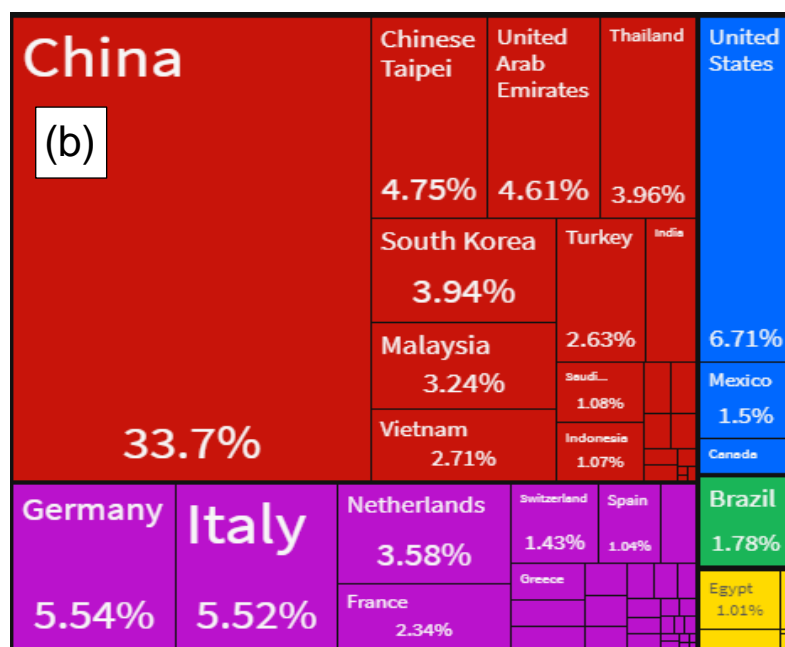
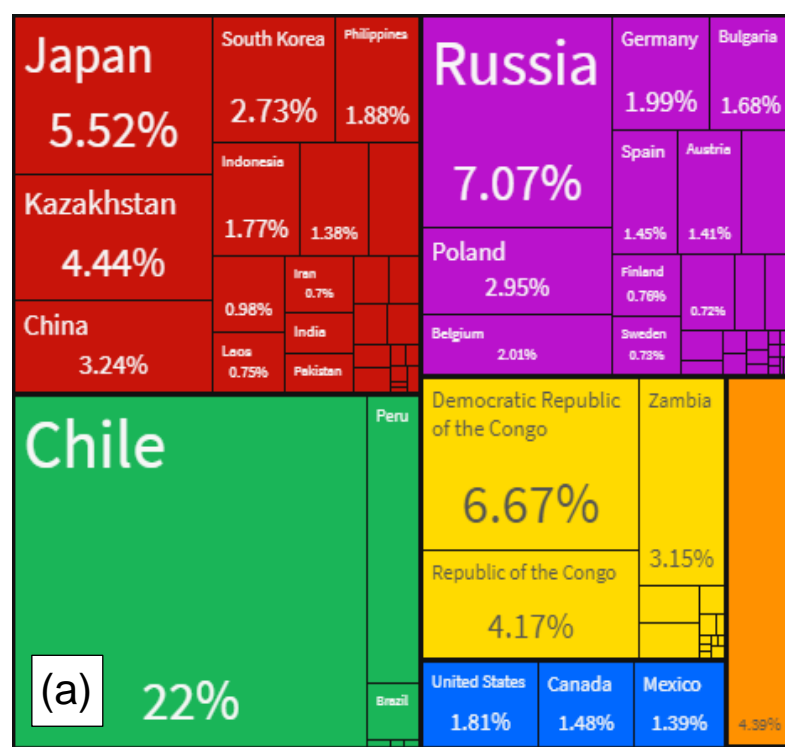


Figura 18: (a) Principais exportadores de cobre refinado em 2019. Destaca-se a participação do Chile (22%) como líder nas exportações do metal, seguido da Rússia (7,07%), República Democrática do Congo (6,67%) e Japão (5,52%). A Austrália (em laranja) é o quinto maior exportador (4,39%). (b) importadores de cobre refinado em 2019, com destaque para a China (33,7%), os EUA (6,71%), a Alemanha (5,54%), Itália (5,52%) e a Holanda (3,58%) (Observatory of Economic Complexity, 2019).

Internacionalmente, o Brasil não se destaca como grande produtor de cobre metálico, e ainda depende da importação para atender o mercado interno. Em 2020, foram 214 mil

toneladas de cobre metálico importadas pelo país (Fig. 19), sendo os maiores fornecedores o Chile, o Peru e a China (COMEXSTAT, 2021).

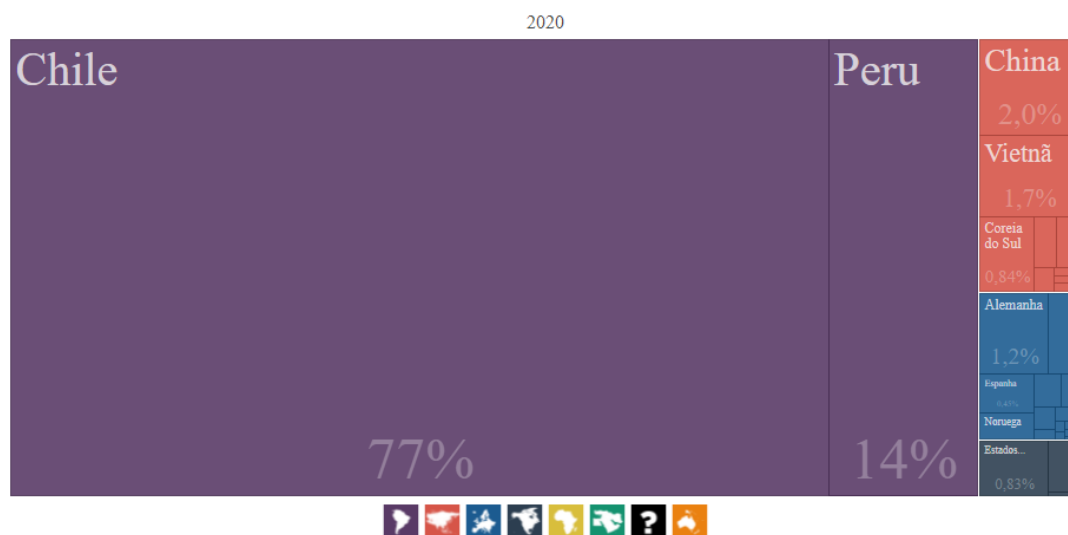


Figura 19: Origem do cobre metálico importado pelo Brasil em 2020. Nota-se que grande parte do produto veio do Chile, que se destaca também como maior produtor mundial de cobre primário (COMEXSTAT, 2021).

c) Fabricação dos painéis solares

O efeito fotovoltaico, o fenômeno físico responsável pela geração de eletricidade a partir da luz solar, foi descoberto pelo cientista francês Edmond Becquerel em 1839. As primeiras células solares, por sua vez, foram desenvolvidas mais de um século depois, em 1954, nos Estados Unidos. Desde então, o princípio por trás dessa tecnologia se mantém o mesmo: a luz do sol desprende os elétrons livres em “bolachas” de silício, gerando uma corrente elétrica que pode ser captada e utilizada.

Para produzir os painéis, são necessárias grandes quantidades de quartzo de alta pureza, geralmente lavrado de pegmatitos. O quartzo é convertido em silício de alta pureza por fusão em fornalhas de arco elétrico (Tamoghna & Sasikala, 2014), em um processo extremamente intensivo em energia. O silício metálico, por sua vez, é obtido pela fusão da sílica em fornos metalúrgicos. Usualmente adiciona-se boro ao semimetal durante o processo metalúrgico que confere polaridade positiva ao silício. Após moldado em lingotes, o silício é fatiado nas camadas que compõem as células solares. Finalmente, são adicionados os condutores metálicos às superfícies das camadas de silício e é precipitada uma camada de fósforo sobre as mesmas, conferindo a polaridade negativa necessária para a formação de corrente elétrica.

Na Figura 20 pode ser observado o processo de confecção de uma célula solar (a) e os principais materiais que a compõem (b).

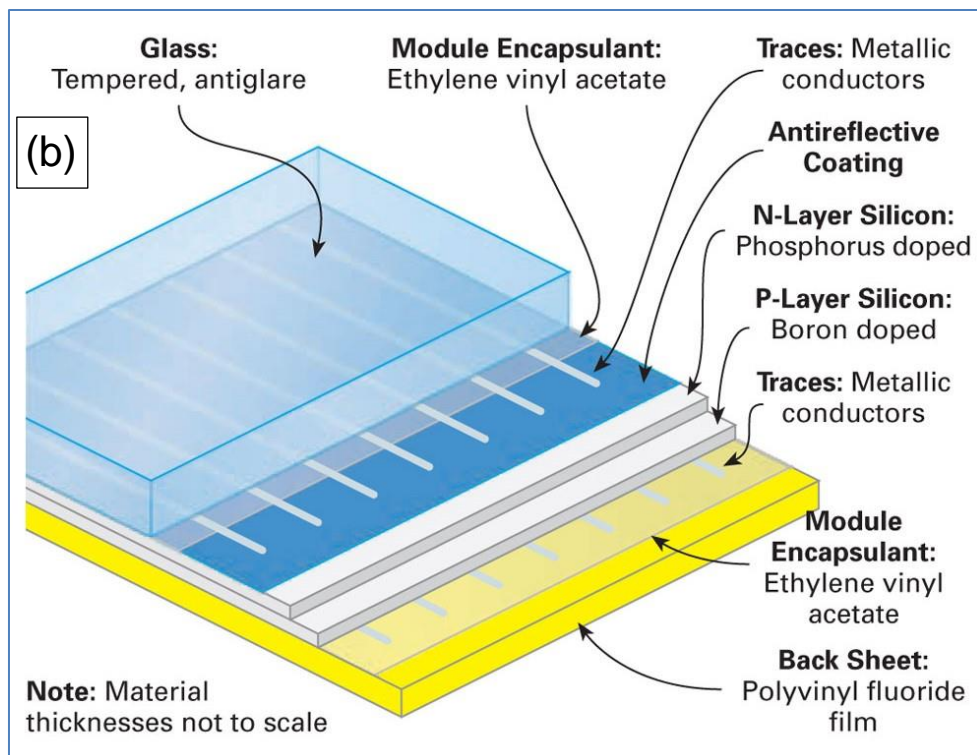
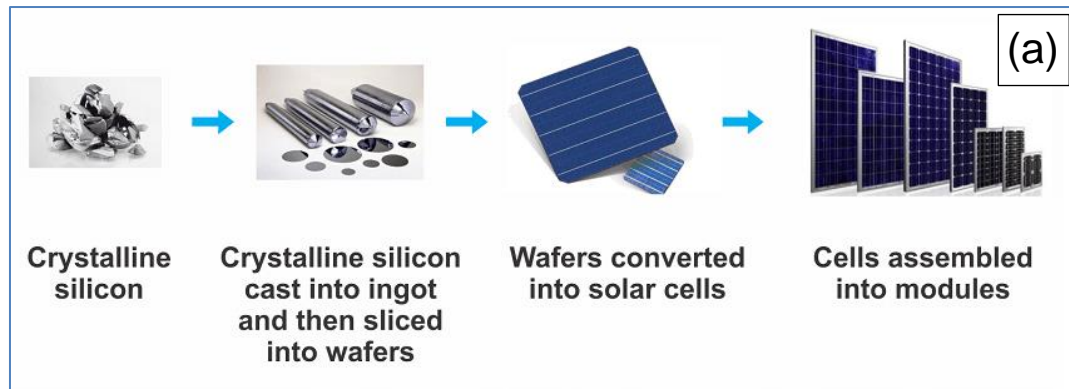


Figura 20: (a) Representação esquemática da produção dos painéis solares. O silício cristalino moldado em lingotes que são fatiados em camada que formam as células solares. (b) As principais partes que compõem uma célula solar são (de cima para baixo) – uma camada de vidro temperado, o envoltório do módulo solar de acetato de etileno de vinil, condutores elétricos metálicos, revestimento antirreflexivo, camadas de silício “N” e “P” e a chapa polivinílica. Espessura das partes fora de escala (The Solar Labs, 2020).

Atualmente, a maior parte das células solares são produzidas na China (Nikkei Asia, 2019), resultado de uma política do governo chinês de utilização de subsídios, restrições ao comércio e manipulação de moeda que visa dar vantagem a empresas chinesas do setor (Stepp & Atkinson, 2012). Além da China, a Coreia do Sul e a Malásia se destacam como grandes produtores de células solares (Fig. 21), ambos países com forte expansão da produção na última década (RTS Corp, em Nikkei Asia, 2019).

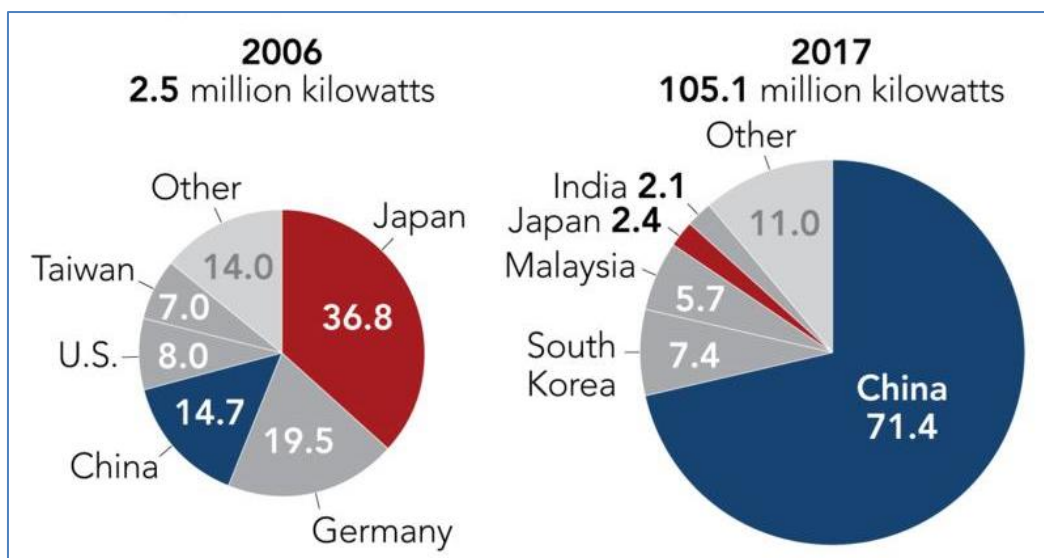


Figura 21: Participação dos países na produção mundial de painéis solares em 2006 e 2017. Ao longo da última década, os países asiáticos despontaram como grandes produtores no cenário global, sendo a China (71,4%), a Coreia do Sul (7,4%) e a Malásia (5,7%) os líderes do setor. Destaca-se também a perda de market share de produtores do Japão, Alemanha e Estados Unidos que, em 2006, eram responsáveis, respectivamente, por 36,8, 19,5 e 8% da produção mundial (RTS Corp, em Nikkei Asia, 2019).

Na cadeia produtiva de painéis solares, o quartzo de alta pureza é um insumo essencial, com as reservas concentradas nos Estados Unidos. Neste contexto, o Brasil se destaca como um dos maiores exportadores de sílica de grau metalúrgico no mundo, suprindo as grandes empresas do setor com o principal material para a confecção das células (USGS, 2021). Contudo, o país ainda não possui capacidade produtiva significativa de painéis solares, dependendo da importação dos módulos para o atendimento da demanda interna (Fig. 22). Em 2020, apenas 3,8% da potência instalada em painéis solares no país veio da produção nacional, sendo a restante atendida por empresas com produção concentrada majoritariamente na Ásia e no Canadá (Greener Consultoria, 2021).

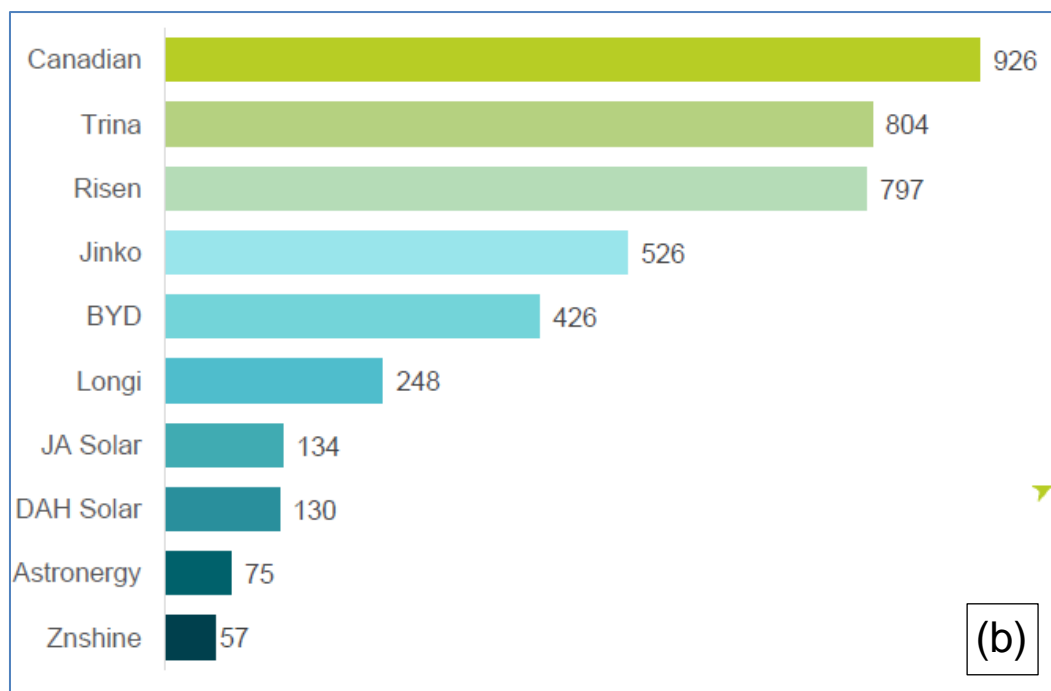
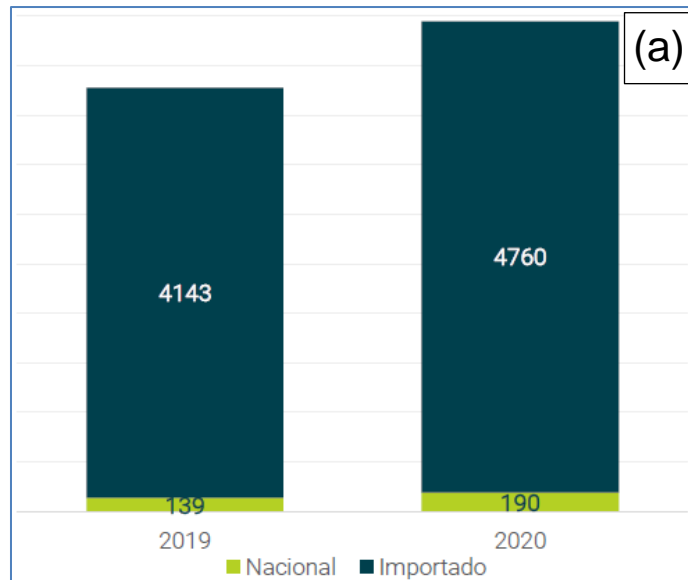


Figura 22: (a) Origem dos módulos fotovoltaicos instalada no país em 2019 e 2020 em termos da potência. Em 2020, apenas 3,8% do mercado foi representado por módulos nacionais. (b) Principais exportadores de painéis solares ao Brasil em 2020. Observa-se que as dez maiores empresas em volume de painéis solares exportados ao Brasil têm operações concentradas majoritariamente na Ásia, com exceção da Canadian Solar, que tem operações na América do Norte também (Greener Consultoria, 2021).

d) Fabricação das turbinas eólicas

Para máxima eficiência, uma turbina eólica pode chegar a 120 metros de altura (Enel, 2021). Por isso, no processo de fabricação e montagem existe uma complexa logística de transporte e instalação, devido à escala das partes envolvidas, que inicia na preparação do terreno e construção da base de concreto que receberá as estruturas.

Como pontuado anteriormente, uma turbina eólica tem essencialmente três partes principais: (1) a torre que conecta a base de concreto até a nacela; (2) a nacela, que contém o gerador e os *shafts* que seguram as hélices; e (3) o rotor com as hélices, que capturam a energia cinética do vento.

- (1) Normalmente, a estrutura de aço é levada de uma fábrica e é construída e erguida *on site*, devido ao seu tamanho. As torres típicas para turbinas eólicas possuem um revestimento tubular que geralmente também é feito de aço inoxidável (Fig. 23).

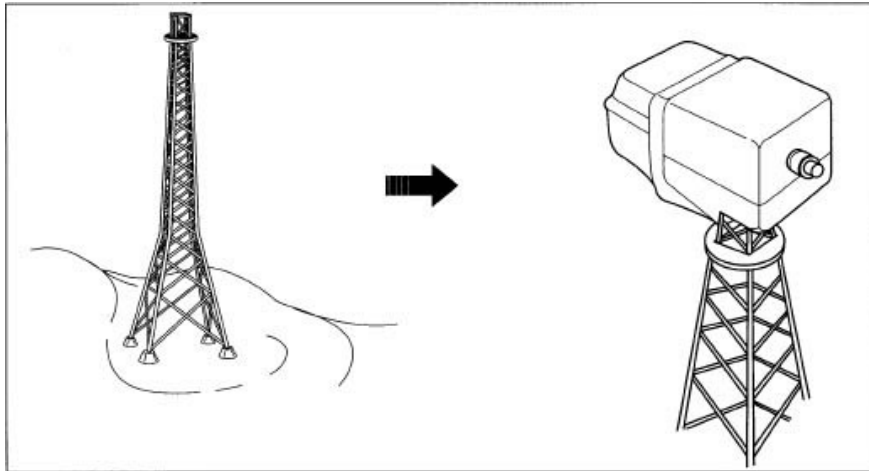


Figura 23: Sistema de instalação das turbinas eólicas. Antes da instalação da nacela, a torre que sustenta a estrutura é erguida. As partes de metal são trazidas *offsite* mas a montagem se dá com ajuda de um guindaste já no local (madehow.com, 2021).

- (2) A nacela é produzida inteiramente *offsite*. Ela é construída sobre uma base provisória e é transportada por caminhões até o local de instalação, onde um guindaste a alça até a base construída sobre a torre.
- (3) A maior parte das hélices é feita de fibra de vidro. Para montá-las, são utilizados moldes em formato de concha, que junto com um bolsão cheio de ar no interior dos mesmos, ajuda a resina de fibra de vidro a manter a sua forma. Esse processo também se dá fora do *site* e o rotor é instalado à nacela com ajuda de guindastes.

No setor eólico, as empresas que instalam as turbinas eólicas são chamadas de montadoras. Ao contrário dos painéis solares, as montadoras líderes na instalação de aerogeradores são, ainda, empresas ocidentais. As três principais empresas do setor são: a dinamarquesa Vestas, a americana GE e a chinesa Goldwind (Fig. 24).

2020 Preliminary Ranking	Turbine OEM	Installations in 2020*	Change	Commentary
1	Vestas	16,186 MW	-	Remains in lead for fifth year in a row
2	GE Renewable Energy	14,135 MW	+2	Moving up two positions from 4th position in 2019
3	Goldwind	13,606 MW	-	Remains in 3rd position for second year running
4	Envision	10,717 MW	+1	Up from 5th position in 2019
5	Siemens Gamesa	8,678 MW	-3	Down from 2nd position in 2019

Figura 24: Ranking das principais empresas produtoras de aerogeradores, em ordem crescente de instalações em 2020. Destaca-se a dinamarquesa Vestas que se mantém no topo pelo quinto ano consecutivo (GWEC, 2021).

O Brasil, por sua vez, possuía dez montadoras atuando no setor em 2017 (ABDI, 2018). Dessas, as que possuem a maior capacidade de produção no país são a americana GE, a hispano-alemã Gamesa e a alemã Wobben (Fig. 25).

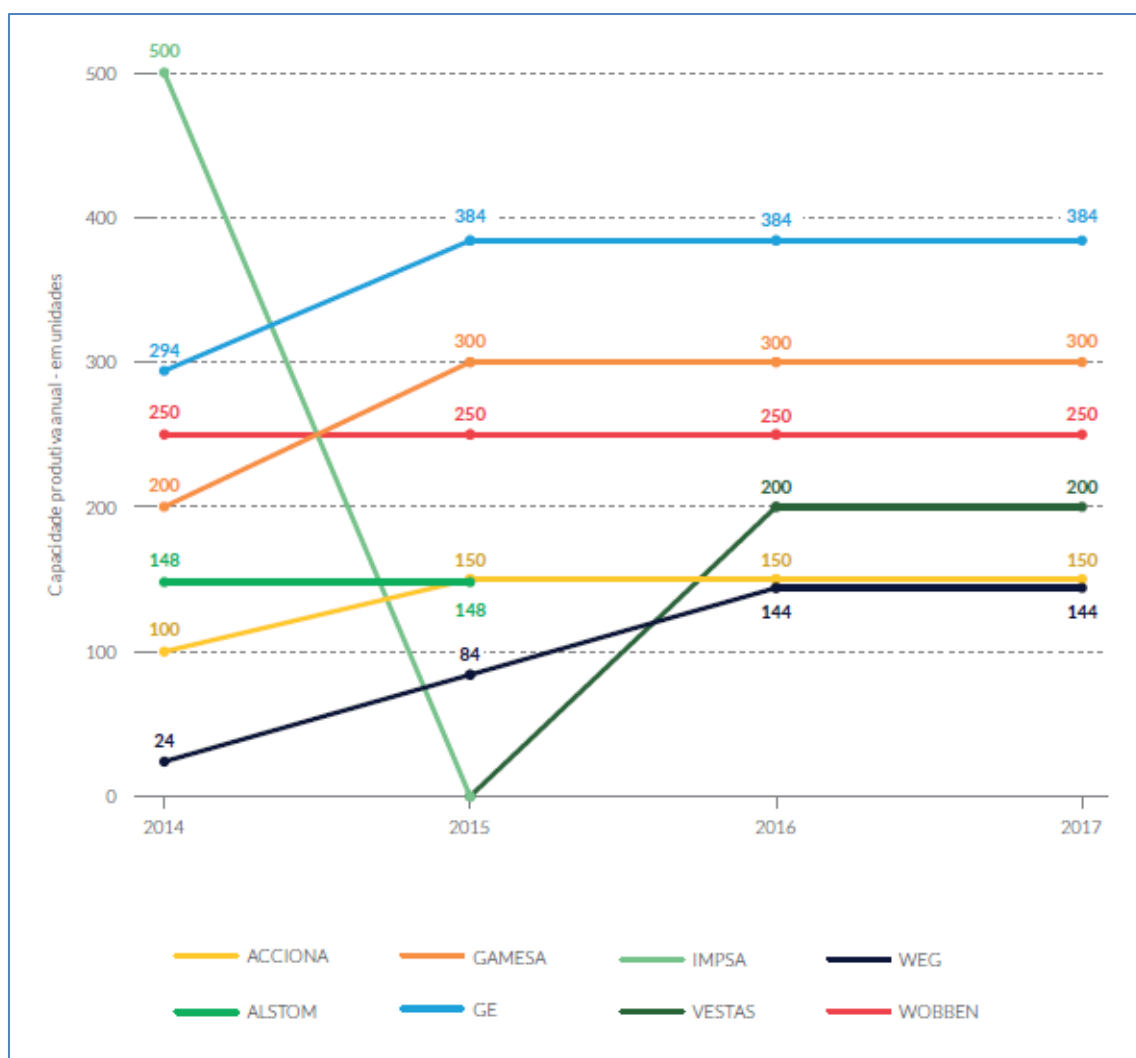


Figura 25: Evolução da capacidade produtiva das principais montadoras de aerogeradores no Brasil entre 2014 e 2017 (ABDI, 2018).

Os componentes (aerogeradores, torres e pás) das torres que geram a energia eólica, por seu tamanho e dificuldade no transporte, geralmente são fabricados próximos aos grandes parques/fazendas de geração do país, concentrados no litoral nordestino e no estado do Rio Grande do Sul. A produção de componentes menores, de mais fácil logística de transporte, concentra-se no parque industrial da Grande São Paulo (Fig. 25). Para os aerogeradores, componentes de maior complexidade na composição de uma turbina eólica, as maiores unidades fabris encontram-se em Camaçari, na Bahia, onde estão instaladas as fábricas das duas maiores montadoras em atuação no país (ABDI, 2018).

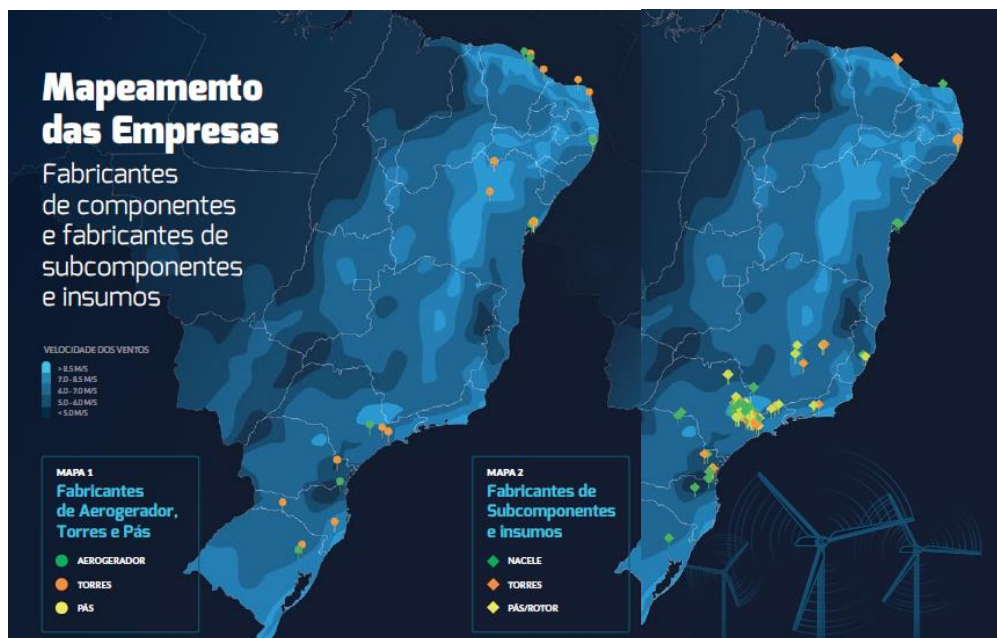


Figura 26: À esquerda, encontram-se destacadas as unidades fabris que produzem os principais componentes das turbinas eólicas – os aerogeradores, as torres e as pás. Percebe-se que as principais unidades estão próximas aos centros geradores de energia eólica, devido à dificuldade de transporte destes itens. À direita, estão destacadas as fabricantes dos subcomponentes das turbinas eólicas – as nacelas, as torres e as pás/rotor. Aqui, percebe-se uma concentração maior destas unidades nos parques industriais da Grande São Paulo (ABDI, 2018).

Apesar da preponderância de grupos internacionais, o Brasil mostra capacidade produtiva suficiente para suprir a própria demanda por turbinas eólicas, como mostra a Figura 27. Contudo, desafios no ecossistema de negócios impedem a produção destinada à exportação desses insumos industriais, que aqui são produzidos essencialmente para atendimento da demanda local (ABDI, 2018)

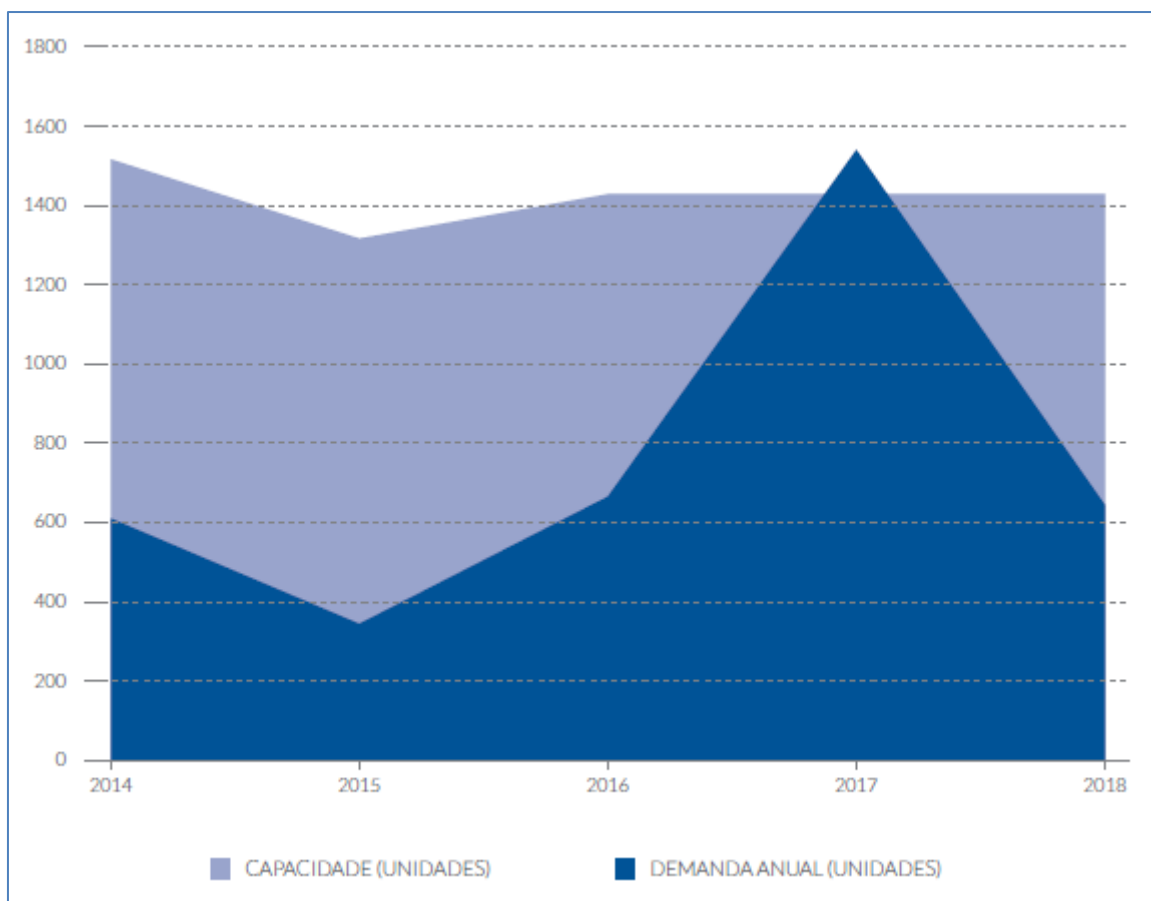


Figura 27: Capacidade versus demanda por aerogeradores no Brasil entre 2014 e 2018 (ABDI, 2018).

3. Cálculo da demanda de cobre para atingimento das metas brasileiras

a) Premissas

Como pontuado anteriormente, a projeção de demanda de cobre gerada tanto pelo incremento da capacidade instalada de geração de energia eólica e solar, leva em consideração três variáveis principais: a intensidade de cobre por GW instalado, a meta a cumprir até 2030, segundo o acordo COP21, e o proporção da capacidade instalada até 2020 que precisará de reposição entre os anos de 2020 e 2030.

A meta de aumento da capacidade instalada de energia eólica a cumprir até 2030 foi calculada subtraindo a capacidade instalada verificada em dezembro de 2020 e a projeção feita pela Empresa de Pesquisa Energética em 2016. Essa primeira foi encontrada em relatórios de Associações dos setores solar e eólico, com base em dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2021). A necessidade de reposição foi calculada a partir de valores de vida útil média das tecnologias estudadas, encontrada em parâmetros de mercado.

b) Cálculos

Para a energia eólica, assumiu-se que as turbinas eólicas sem ímãs permanentes (4982 tCu/GW) seguirão sendo utilizadas em instalações *onshore* até 2030. Este fato se deve ao gerador deste modelo de turbina girar mais rápido que as pás a fim de diminuir a

necessidade por ímãs permanentes, mais pesados e caros que os utilizados em modelos sem magnetos permanentes. Para manter a velocidade do gerador mais acelerada, é necessária uma *gearbox* em constante operação, o que torna essas turbinas eólicas mais dependentes de manutenção, inapropriando-as para o uso em parques eólicos em alto mar (Manberger, 2018). Como indicado na Figura 28, as instalações de parques eólicos no Brasil, até o final de 2020, se encontram todos no continente.

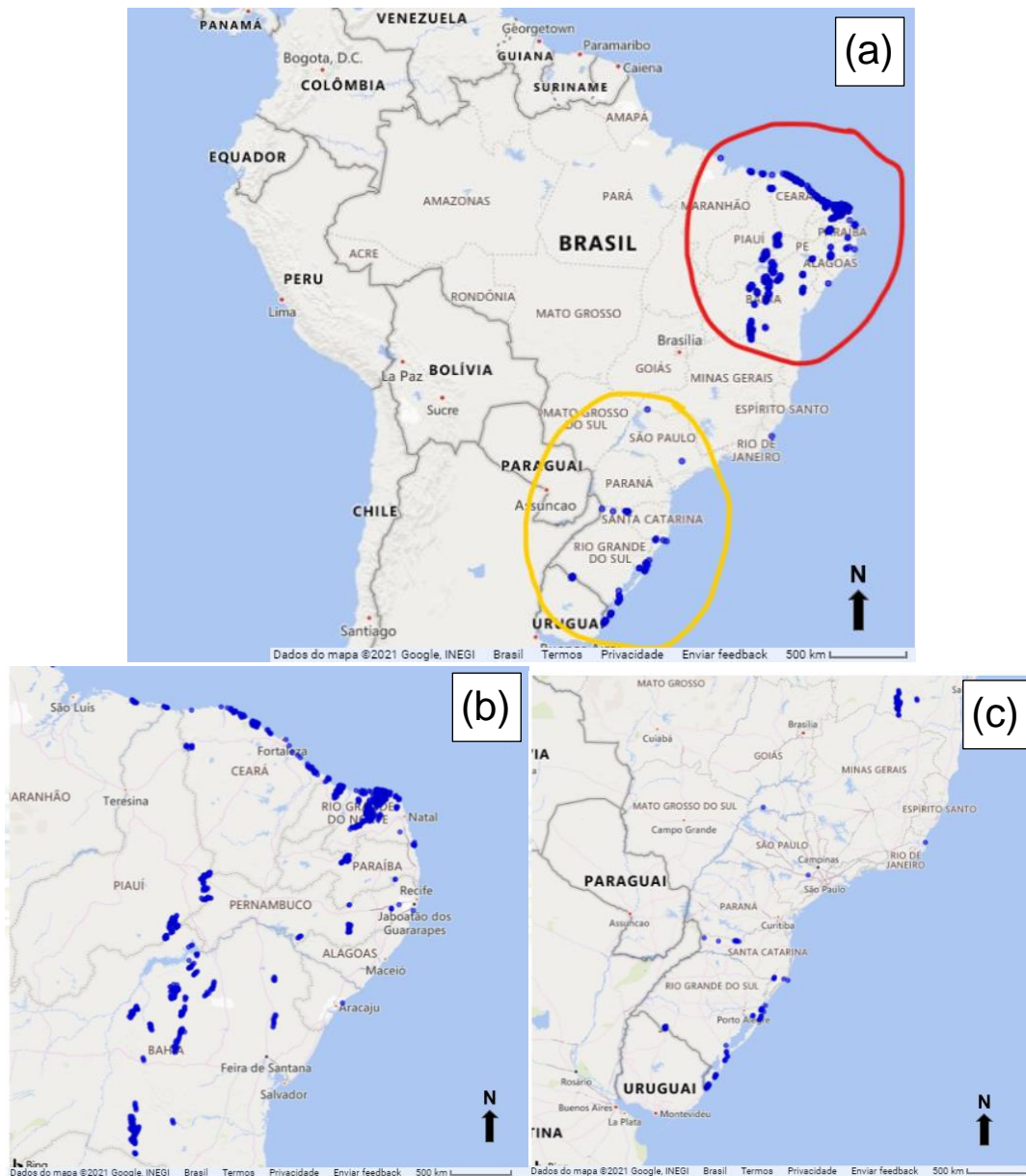


Figura 28: (a) a imagem, destacam-se com os círculos azuis os projetos eólicos em operação, em construção e projetados no país. O Brasil tem duas principais regiões geradoras de energia eólica – o Nordeste, destacado pela linha vermelha, e o Sul circulado, com a linha amarela. (b) a Região Geradora Nordeste concentra projetos instalados ao longo da costa norte do país, principalmente no litoral do Ceará e do Rio Grande do Norte, e nos interiores baiano e pernambucano. (c) no Sul, os projetos estão instalados principalmente ao longo da costa gaúcha (ANEEL, 2021).

Dessa forma, com 100% da infraestrutura elétrica em operação e em construção no Brasil presentes no continente, considerou-se que a intensidade de cobre da infraestrutura eólica brasileira é de 4982 toneladas de Cu/GW, o equivalente às tecnologias de turbinas sem ímãs permanentes que reduzem o consumo de ETRs e são as prevalentes em instalações *onshore* (Manberger, 2018).

Segundo relatório da Associação Brasileira de Energia Eólica, o Brasil terminou o ano com potência instalada de 17,75 GW (ANEEL, 2021; ABBeólica, 2021). Dessa forma, para este trabalho, projetou-se a demanda de cobre provocada pela adição de 13,91 GW de potencial de geração de energia eólica à matriz elétrica brasileira.

A vida útil média para um sistema eólico utilizada neste trabalho seguiu a norma IEC 61400-1 que recomenda que toda infraestrutura eólica instalada no país entre 2000 e 2010 será reposta em, no mínimo, 20 anos (EPE, 2021). Assim, considerou-se que 0,91 GW de potência instalada de energia eólica deverão ser repostos até 2030 demandando cobre adicional para tal (Windpower Monthly News Magazine, 2003; Global Wind Energy Council, 2011).

A energia solar participa da matriz elétrica brasileira de duas formas principais: i) centralizada, quando usinas fotovoltaicas estão ligadas ao Sistema Interligado Nacional (SIN), e ii) descentralizada, quando micro e pequenos produtores individuais instalam unidades fotovoltaicas em residências, fazendas e centros comerciais a fim de gerar eletricidade para consumo próprio, principalmente. Para projeção do *mix* de tecnologias que compõem essa primeira forma de geração de energia solar, utilizou-se o *Dashboard* de Dados Técnicos de Geração Centralizada da Greener Consultoria, uma empresa de consultoria especializada em energia fotovoltaica (Fig. 29).

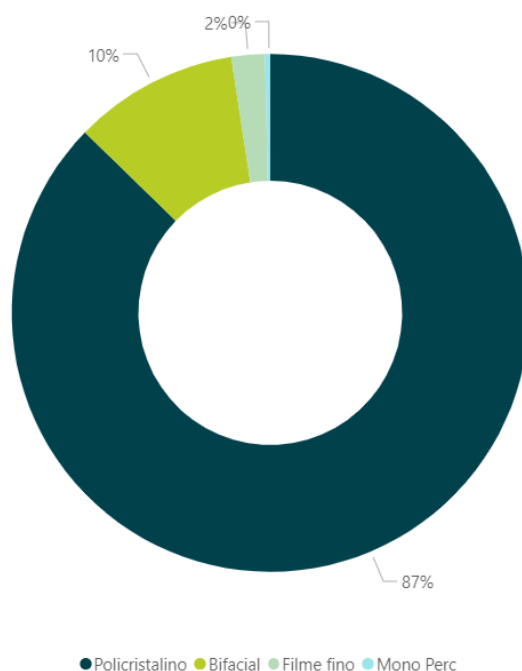


Figura 29: Características dos painéis fotovoltaicos de acordo com a potência instalada centralizada de geração de energia solar no Brasil, que é composta majoritariamente por módulos policristalinos e bifaciais (Greener Consultoria, 2021).

Este painel consolida informações acerca da situação atual do setor no país, apontando a seguinte distribuição de tecnologias para a potência instalada de energia solar centralizada no Brasil:

Tabela 2: *distribuição das principais tecnologias de módulos fotovoltaicos na potência instalada centralizada de energia solar no Brasil (Greener Consultoria, 2021).*

Potência Por Tecnologia por Módulo GC (GW)	
Policristalino	2,51407 (87,3%)
Bifacial	0,29636 (10,3%)
Filme fino	0,06055 (2,1%)
Mono Perc	0,00913 (0,3%)

Dessa forma, considerando que os módulos mono e policristalinos, são variações da tecnologia de silício cristalino - onde o silício cristalino é combinado a outros metais, a fim de gerar a diferença de carga responsável pela geração de eletricidade, tem-se que essa tecnologia representa aproximadamente 98% do mercado brasileiro de painéis solares (Manberger, 2018; Elysia, 2019).

Os outros 2% são compostos por painéis de filme fino (Manberger, 2018) que, segundo Greener Consultoria (2021), divide este mercado de painéis mais delgados utilizando a distribuição de 70% para os painéis CIGS (450 tCu/GW) e 30% para os painéis de Cádmiu–Telúrio (5181 tCu/GW). Extrapolando todas essas proporções para a potência instalada no Brasil, chegou-se a uma intensidade de cobre de 903,71 tCu/GW.

$$I_s = (98\% \times 884) + (2\% \times ((30\% \times 5181) + (70\% \times 450)))$$

A meta a cumprir foi o calculada utilizando dados da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (Absolar, 2021) e da ANEEL (2021). Segundo a Associação, o Brasil encerrou o ano de 2020 com uma potência instalada de 3,1 GW de energia solar de geração centralizada, 40% da capacidade total do país (Fig. 30). Dessa forma, este trabalho considerou, para esta modalidade de geração, a meta a cumprir de 13,91 GW.

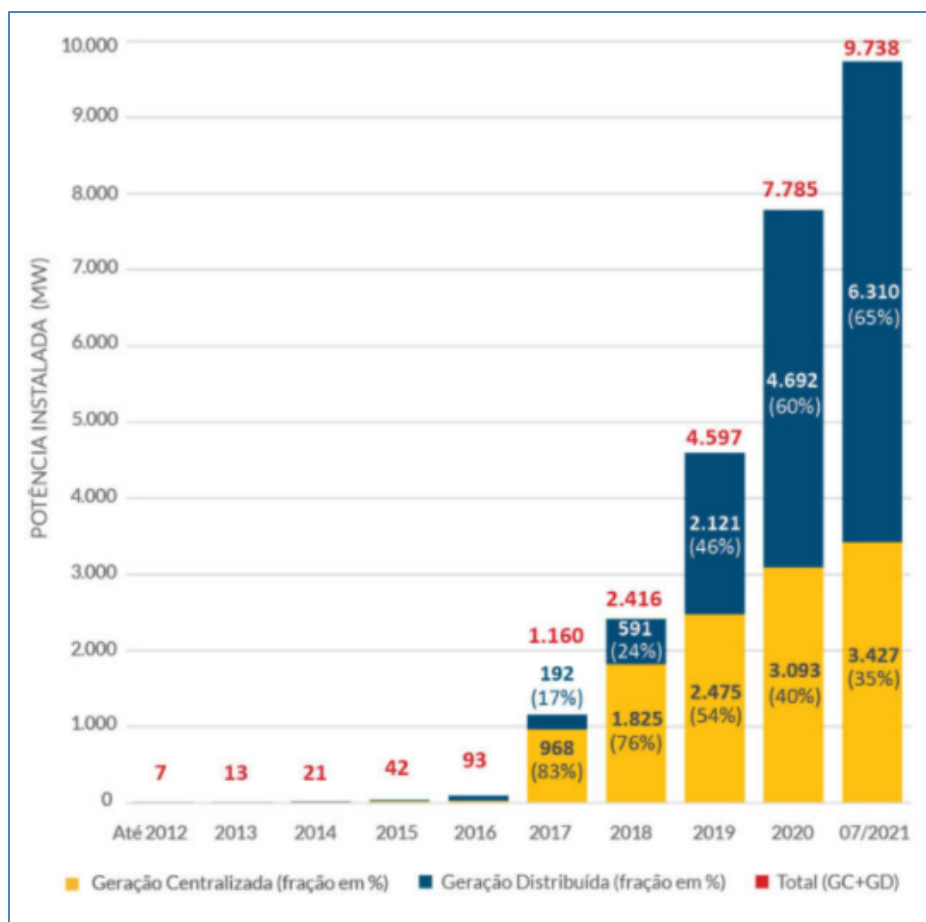


Figura 30: A energia solar no Brasil é majoritariamente gerada de forma distribuída. Há forte tendência crescente na capacidade de geração de energia solar no país, fechou o ano de 2020 com um total de 7,8 GW de potência instalada (ANEEL, 2021; Absolar, 2021).

Para este trabalho, não foi considerada a necessidade de reposição da infraestrutura de energia solar centralizada no Brasil, isto é, a necessidade de instalação de novos equipamentos em substituição aos que perderam eficiência devido ao maior longo tempo de operação. Este fato se deve à ausência de potência instalada de energia solar significativa no país entre 1995 e 2005 (ANEEL, 2018), uma vez que o padrão de vida útil média de um módulo fotovoltaico é de 25 anos (mínimo 20 anos), segundo a ANEEL (2018).

A energia solar no Brasil é gerada, em grande parte, de forma distribuída. Isto é, os painéis são instalados para consumo individual do produtor e exportação do excedente para o SIN. Até o final de 2020, 60% da capacidade instalada do Brasil se enquadrava nesta modalidade (Absolar, 2021; ANEEL, 2021). A Empresa de Pesquisa Energética projeta, contudo, que a geração centralizada passará a compor uma proporção cada vez maior da capacidade instalada total.

Além disso, com banco de dados de Geração Centralizada cedido para esse trabalho pela empresa Greener Consultoria, que foi utilizado neste trabalho (Greener Consultoria, 2021), observa-se uma grande pulverização do mercado solar de autoprodução e que os dados referentes à participação das tecnologias de módulos solares a nível nacional são estão identificados, apesar de haver uma *dashboard* semelhante em desenvolvimento. Dessa forma, escolheu-se utilizar a mesma intensidade de cobre utilizada para a geração centralizada, ou seja, 903,71 tCu/GW.

A meta agendada na COP21 a cumprir foi calculada também utilizando o mesmo método descrito para a geração centralizada, ou seja, subtraindo capacidade instalada no Brasil até o final de 2020, 4,7 GW (Absolar, 2021; ANEEL, 2021) da projeção de 8 GW instalados até 2030 (EPE, 2016). Assim, para fins de cálculo de demanda de cobre, foi considerado o volume de cobre necessário para a instalação de 3,3 GW de energia solar voltada à geração descentralizada.

Relatórios gerenciais da Aneel, assim como no caso da geração centralizada, mostram que não havia potência instalada relevante de módulos fotovoltaicos no Brasil entre 1995 e 2005 (Aneel, 2018) e, dessa forma, também não foi considerada a necessidade de reposição de módulos fotovoltaicos no período estudado.

Utilizando as variáveis segundo os métodos descritos anteriormente, foram calculadas as demandas de cobre para alcançar a meta brasileira até 2030 nas frentes de energia solar e eólica. Na Tabelas 3 e 4, constam as demandas calculadas de cobre para ambas as frentes.

Tabela 3: Demanda total de Cobre para a atingimento das metas de energia eólica do Brasil no Acordo de Paris

Intensidade de Cu	Un	Meta 2030 a cumprir	Un	Reposição até 2030*1	Un	Demanda de Cu até 2030	Um
4.982,00	tCu/GW	15,25	GW	0,91	GW	80.514,10	Ton

Tabela 4: Demanda total de Cobre para a atingimento das metas de energia solar do Brasil no Acordo de Paris

Modalidade	Intensidade de Cu	Un	Meta 2030 a cumprir	Un	Reposição até 2030*1	Un	Demanda de Cu até 2030	Um
Geração Centralizada	903,71	tCu/GW	13,91	GW	0	GW	12.567,84	Ton
Geração Distribuída	903,71	tCu/GW	3,31	GW	0	GW	2.989,46	Ton
Total							15.557,30	Ton

Obs.: amostras das calculadoras utilizadas para o cálculo das demandas de cobre geradas a partir do cumprimento das metas do Brasil no Acordo de Paris, na frente de diversificação das fontes renováveis de energia na matriz elétrica brasileira. (3) Projeção da demanda de cobre provocada pela expansão da capacidade instalada de geração de energia eólica no Brasil (4) Projeção da demanda de cobre provocada pela expansão da capacidade instalada de geração de energia solar no Brasil.

Assim, tem-se uma demanda total de cobre de 96.071,40 toneladas de cobre para o cumprimento da meta brasileira no Acordo de Paris, levando em consideração apenas a atualização da matriz elétrica do país.

c) Projeções de Produção de Cu até 2030

O primeiro passo para entender a relevância da demanda de cobre que foi calculada dentro do contexto deste trabalho é entender a escala da produção de liga de cobre no Brasil,

o insumo que é de fato utilizado para a fabricação dos módulos fotovoltaicos e turbinas eólicas.

O Brasil possui reservas de cobre relevantes, estimadas em mais de 11 milhões de toneladas de metal contido, o equivalente a 1,6% das reservas mundiais (ANM, 2017). Contudo, a *commodity* ainda tem participação moderada na produção mineral comercializada (Fig. 30), compondo 7,9% do valor gerado pela comercialização das substâncias metálicas em 2019 (ANM, 2020).

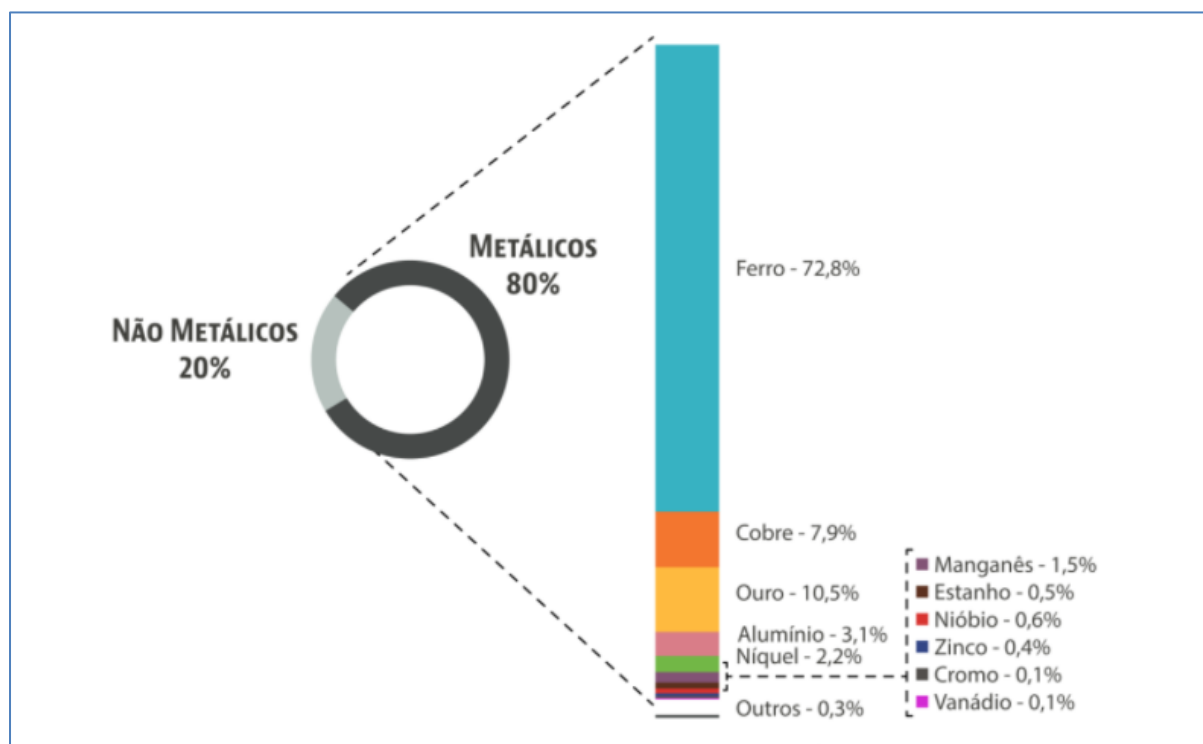


Figura 31: Participação das principais substâncias metálicas no valor da produção mineral comercializada no Brasil em 2019. Vê-se a participação secundária de metais como o cobre e o ouro e o franco domínio do ferro na balança mineral do país (ANM, 2020).

Por fim, a produção beneficiada de cobre em 2019 foi de 363.268 toneladas de Cu contido, uma queda aproximada de 6% em comparação a 2018 (ANM 2019; 2020). Essa produção coloca o Brasil entre os 20 maiores produtores da *commodity* do mundo (Fig. 12), e o 4º maior produtor na América Latina (ICSG, 2020).

Contudo, o país não consta entre os maiores produtores do cobre metálico (ICSG, 2020). A produção da liga em 2018 foi de aproximadamente 147.000 toneladas em 2018, um crescimento de 2,8% após uma forte retração de 37% entre 2016 e 2017 (ANM, 2020), fruto do agravamento da crise econômica do Brasil. Assim, o país se coloca como importante produtor de produtos básicos, como o concentrado de cobre, mas depende da importação para o abastecimento de produtos semimanufaturados, como é o caso das ligas de cobre (Fig. 32) (ANM, 2020).

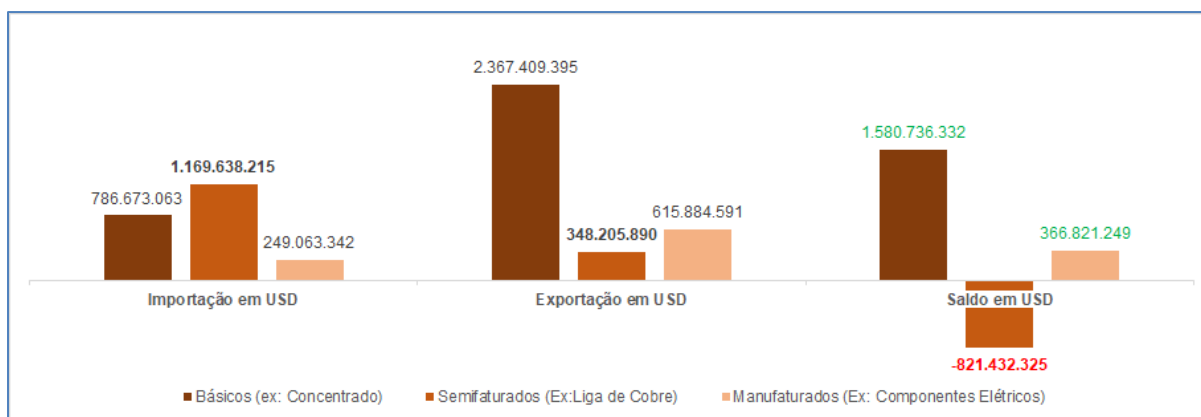


Figura 32: Valor das exportações e importações de produtos de cobre em 2019 pelo Brasil em dólares americanos. Nota-se que o único balanço negativo é referente aos produtos semimanufaturados de cobre, aqui representados principalmente pelas ligas de cobre, apesar da produção importante de cobre beneficiado verificada no mesmo ano (ANM, 2020).

No que tange o volume de cobre necessário para cumprimento das projeções feitas para o setor elétrico brasileiro pela EPE, no contexto do Acordo de Paris de 2015, (96.071,40 toneladas de Cu) nota-se que a representatividade do mesmo na produção de liga metálica de cobre é relevante – 65% da produção total nacional verificada em 2018 (ANM, 2020). Para entender a representatividade deste montante de cobre ao longo do período estudado, fez-se uma projeção da produção de liga metálica de cobre utilizando a taxa de crescimento verificada entre 2017 e 2018 – 2,8% ao ano, visto que a mesma se encontra em linha com a previsão de crescimento médio feita pelo *International Copper Study Group* para o período entre 2020 e 2022 (ICSG, 2020). A essa taxa de crescimento, o Brasil chegará a um total de 205 mil toneladas de Cu metálico produzido em 2030 (Fig. 33).

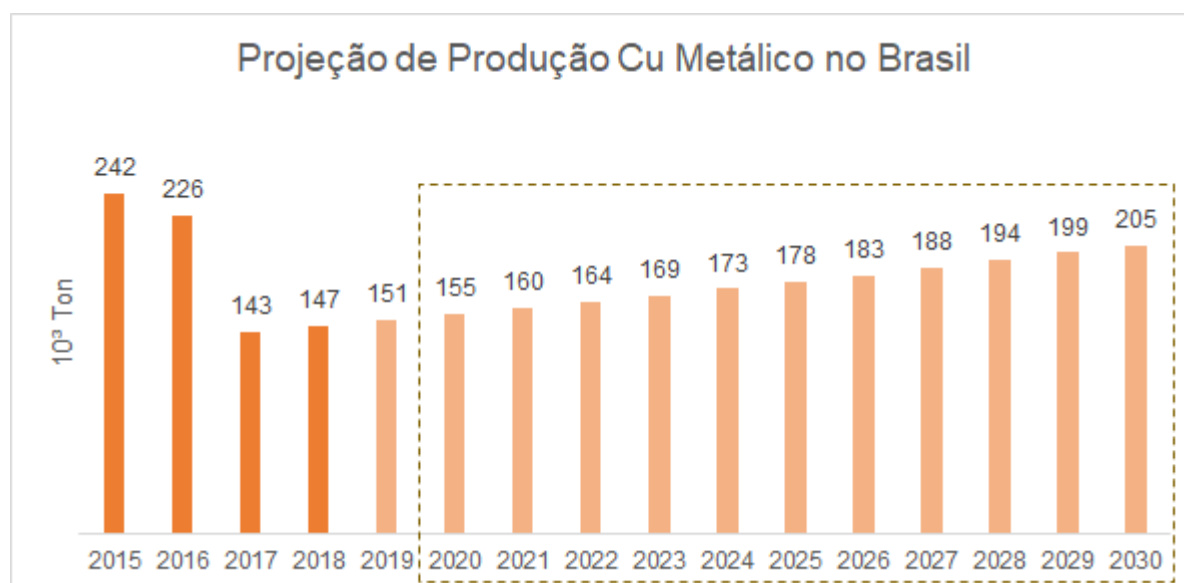


Figura 33: Projeção da produção de cobre metálico no Brasil. Foi considerado um crescimento anual de 2,8% até 2030, mantendo o crescimento verificado entre 2018 e 2019 e a previsão feita pelo ICGS para 2022 (dados de ANM, 2020; ICGS, 2021).

Utilizando esta projeção, e considerando que a demanda de cobre originada dos esforços para a construção da infraestrutura necessária para que o país alcance as metas de 2030, tem-se que a diversificação da matriz elétrica pretendida pelo Brasil consumirá entre 5 e 6% da produção anual de cobre metálico entre 2020 e 2030.

4. Conclusão

Dessa forma, interpreta-se que existem diversos fatores por trás da fisibilidade de suprimento da demanda de cobre gerada pelo atingimento das metas do Brasil no Acordo de Paris de 2015, que não apenas a disponibilidade de cobre produzido nacionalmente. De pronto, analisando unicamente a relação entre a produção de cobre beneficiada anual (por volta de 360 mil toneladas de Cu contido) e a produção de liga metálica de cobre (aproximadamente 150 mil toneladas ao ano), vê-se que há disponibilidade de matéria prima produzida no Brasil que poderia vir a ser refinada no país, sem maiores necessidades de aumento de produção de minério.

Percebe-se que o Brasil possui dois cenários relativamente distintos no que tange a verticalização das cadeias produtivas de painéis solares e de turbinas eólicas. No primeiro, ainda há franca dependência da importação para o atendimento da demanda interna, sendo esta essencialmente atendida pela China. O segundo cenário é um pouco mais favorável para a indústria nacional, devido à história mais longa do Brasil com a energia eólica e à própria natureza de instalação de parques produtores.

Conclui-se, dessa forma, que o gargalo inicial para o atendimento da demanda de cobre – e de qualquer outra *commodity* mineral – não se encontra na produção de minério, apesar de haver grande potencial para o mesmo. Para que o país possa verticalizar as cadeias produtivas das tecnologias estudadas neste trabalho, é preciso, prioritariamente, aumentar a capacidade de produção de semimanufaturados de cobre, ou seja, é necessário investir na produção metalúrgica nacional para que ela possa suprir a indústria com a liga de cobre necessária.

A necessidade da transição energética da economia para sistemas de baixo carbono tem se mostrado como uma tendência irreversível para preservação do meio ambiente e da sustentabilidade do planeta, como atestado pelos esforços globais acordados no COP21 e, mais recentemente, na COP26. Estes compromissos internacionais indicam que as energias eólica e fotovoltaica serão fatores muito importantes para que as metas definidas sejam alcançadas no tempo previsto. Para isso, o cobre continuará a ser um insumo da mineração essencial, juntamente com todos demais citados neste trabalho. As perspectivas de demandas mundiais superiores à produção sugerem a existência de uma grande oportunidade econômica ao Brasil, com o desenvolvimento da exploração e lavras nas províncias produtoras de cobre, notadamente no Pará (Carajás) e Bahia, além do potencial de outras províncias, como destacado por Juliani et al. (2014; 2021). O aproveitamento destas oportunidades requer programas e investimentos estratégicos que podem se alinhar com planejamentos estratégicos para produção de cobre metálico e, dada a disponibilidade de quartzo de alta pureza, de sílica numa primeira etapa, e silício metálico posteriormente, contribuindo para o desenvolvimento da indústria de produção de energia limpa no Brasil.

Obviamente existe uma vantagem financeira na verticalização de cadeias que se tornarão cada vez mais importantes para a economia global, visto que se diminuem os custos logísticos de transporte, legais e de importação para o suprimento dessas tecnologias para o mercado nacional. Contudo, há uma clara oportunidade de desenvolvimento econômico que torna análises, como a feita neste trabalho, de cada vez maior importância. Quando é

analisada a situação atual das discussões de combate às mudanças climáticas e o potencial brasileiro de participação relevante em todos os pontos dessas cadeias produtivas, percebe-se que mais do que aumentar ou diminuir as produções de minério, ou qualquer outra *commodity* que seja, o país precisa repensar estrategicamente quais caminhos a economia do futuro oferece para que o país volte a um caminho de desenvolvimento, ascensão social e projeção internacional.

Referências Bibliográficas

- ABBEólica, 2021, Boletim Anual de Geração 2020: http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2021/06/PT_Boletim-Anual-de-Gera%C3%A7%C3%A3o_2020.pdf (Acesso em agosto de 2021).
- ABDI, 2018, Atualização do Mapeamento da Cadeia Produtiva da Indústria Eólica no Brasil: http://inteligencia.abdi.com.br/wp-content/uploads/2017/08/2018-08-07_ABDI_relatorio_6-1_atualizacao-do-mapeamento-da-cadeia-produtiva-da-industria-eolica-no-brasil-WEB.pdf (Acesso em 08 de novembro de 2021).
- Absolar, 2021, Energia Solar Fotovoltaica no Brasil: Infográfico ABSOLAR: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/> (Acesso em 25 de julho de 2021).
- Alves-Dias, P.; Bobba, S.; Carrara, S.; Plazzotta, B. 2020. The role of rare earth elements in wind energy and electric mobility, EUR 30488 EN, Publication Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-79-27016-4, doi:10.2760/303258, JRC122671.
- Andrade et al, 1997, A Cadeia Produtiva do Cobre: Panorama Internacional e Nacional: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/13441/3/BS%2006%20A%20cadeia%20produtiva%20do%20cobre_P_BD.pdf (Acesso em novembro de 2021).
- ANEEL, 2018, Boletim de Informações Gerenciais - 4º Trimestre de 2018: <http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14854008/Boletim+de+Informa%C3%A7%C3%B5es+Gerenciais+-+4%C2%BA+trimestre+de+2018/36e91555-141a-637d-97b1-9f6946cc61b3> (Acesso em julho de 2021).
- ANEEL, 2021. ANEEL ultrapassa em mais de 800MW a meta de expansão da geração 2020: https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/aneel-ultrapassa-em-mais-de-800-mw-a-meta-de-expansao-da-geracao-em-2020/656877?inheritRedirect=false (Acesso em : 19 agosto de 2021).
- ANEEL, 2021. Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA): Capacidade de Geração do Brasil: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrJoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2liwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9> (Acesso em: 4 de julho de 2021).
- ANM 2017, Sumário Mineral 2017: https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumariomineral_2017 (Acesso em agosto de 2021).
- ANM 2018, Sumário Mineral 2018: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2018> (Acesso em agosto de 2021).
- ANM, 2019, Boletim do Setor Mineral - Outubro 2019: <http://antigo.mme.gov.br/documents/36108/1006289/Boletim+do+Setor+Mineral+-+janeiro+2020/ffe0fb2c-94ac-b258-490a-05702ebe687c> (Acesso em agosto de 2021).
- ANM, 2020, Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas – 2020: https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb_2020_ano_base_2019_revisada2_28_09.pdf (Acesso em agosto de 2021).
- Brasil em mapas, 2021, Emissões de dióxido de carbono (CO2) por estados do Brasil: https://www.instagram.com/p/CVyYHH_vZcV/?utm_medium=copy_link (Acesso em 03 de novembro de 2021).

- Bettencourt, J.S.; Juliani, C.; Xavier, R.P.; Monteiro, L.V.S.; Bastos Neto, A.C.; Klein, E.L.; Assis, R.R.; Leite Júnior, W.B.; Moreto, C.P.N.; Fernandes, C.M.D. 2016 Metallogenetic systems associated with granitoid magmatism in the Amazonian Craton: An overview of the present level of understanding and exploration significance. J. S. Am. Earth Sci., 68: 22–49.
- Carta Capital, 2021, Muitas promessas, poucos compromissos. O que dizem ambientalistas sobre o resultado da COP26: <https://www.cartacapital.com.br/mundo/resultados-analise-cop-26/> (Acesso em 19 de novembro de 2021).
- Clean Energy Review, 2021, Solar PV Cell Construction: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-pv-cell-construction> (Acesso em 20 de outubro de 2021)/.
- Climate Watch, 2020, Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from?: <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector> (Acessado em outubro de 2021).
- COMEX STAT, 2021, Plataforma de visualização de dados de comércio exterior do Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/comex-vis> (Acesso em 01 de novembro de 2021).
- CrashCourse, 2019, The Engineering Challenges of Renewable Energy: Crash Course Engineering #30: <https://www.youtube.com/watch?v=4k5gyYAAEEU> (Acesso em 25 de outubro de 2021).
- ECMWF, 2017, Main Sources of carbon dioxide emissions: <https://www.che-project.eu/news/main-sources-carbon-dioxide-emissions> (Acesso em 13 de outubro de 2021).
- Elysia, 2019, Como funciona a energia solar: economia e sustentabilidade: <https://conteudo.elysia.com.br/como-funciona-energia-solar> (Acesso em setembro de 2021).
- Enel, 2021. Hélice eólica. Moinhos de vento do terceiro milênio: é assim que as turbinas eólicas conseguem produzir eletricidade explorando as correntes de ar: <https://www.enelgreenpower.com/pt/learning-hub/energias-renoveveis/energia-eolica/helice-eolica> (Acesso em novembro de 2021).
- EPE, 2016, O Compromisso do Brasil no Combate às Mudanças Climáticas: Produção e Uso de Energia: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/sala-de-imprensa/noticias/Documents/NT%20COP21%20iNDC.pdf> (acesso em novembro de 2020).
- EPE, 2021, Empreendimentos eólicos ao fim da vida útil: Situação Atual e Alternativas Futuras: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-563/NT-EPE-DEE-012-2021.pdf> (Acessado em agosto de 2021).
- Época Negócios, 2021, Compromissos do Brasil na COP-26 não destravam o Fundo Amazônia: <https://epocanegocios.globo.com/Um-So-Planeta/noticia/2021/11/epoca-negocios-compromissos-do-brasil-na-cop-26-nao-destravam-o-fundo-amazonia.html> (Acesso em 19 de novembro de 2021).
- Folha de São Paulo, 2021, Podcast Café da Manhã – COP26: as promessas do Brasil e do mundo para o clima: <https://open.spotify.com/episode/289YXKjnv3Q50SyxxfkyVa?si=672b54a909594fe3> (Ouvindo em 03 de novembro de 2021).

- GHG Protocol, 2016, Global Warming Potential Values: https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf (Acesso em novembro de 2021).
- GloboNews, 2015. COP 21: representantes de 195 países aprovam acordo global do clima: <http://g1.globo.com/natureza/noticia/2015/12/representantes-de-195-paises-aprovam-acordo-global-do-clima.html> (Acesso em 08 de setembro de 2021).
- Governo Federal do Brasil, 2020. Brazil First NDC (updated submission): [https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Brazil%20First/Brazil%20First%20NDC%20\(Updated%20submission\).pdf](https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Brazil%20First/Brazil%20First%20NDC%20(Updated%20submission).pdf) (Acesso em 19 de agosto de 2021).
- Greener Consultoria, 2021, Dados Técnicos GC da Greener: <https://www.greener.com.br/dados-tecnicos-gc/> (Acesso em 11 de julho de 2021).
- Greener Consultoria, 2021, Estudo Estratégico Geração Distribuída – Mercado Fotovoltaico: <https://www.greener.com.br/estudo/estudo-estrategico-mercado-fotovoltaico-de-geracao-distribuida-2-semester-de-2020/> (Acesso em julho de 2021).
- Griffith, Saul. Calisch, Sam. Fraser, Laura. 2020. Rewiring America: A Field Manual for The Climate Fight.[<https://www.rewiringamerica.org/policy/rewiring-america-handbook>]
- GWEC, 2011, Global Wind Report: Annual Market Update 2010: https://gwec.net/wp-content/uploads/2012/06/GWEC_annual_market_update_2010_-_2nd_edition_April_2011.pdf (Acesso em setembro de 2021).
- GWEC, 2021, GWEC releases Global Wind Turbine Supplier Ranking for 2020:<https://gwec.net/gwec-releases-global-wind-turbine-supplier-ranking-for-2020/> (Acesso em 13 de novembro de 2021).
- ICSG, 2020, The World Copper Factbook 2020: <http://www.icsg.org/index.php/component/jdownloads/finish/170/3133> (Acesso em julho de 2021).
- ICSG, 2021, ICSG 2021-2022 Forecast: <https://www.icsg.org/index.php/statistics/forecasts> (Acesso em 04 de setembro de 2021).
- IEA, 2021, The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions> (Acesso em novembro de 2020).
- IPCC, 2014, Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/> (Acesso em 19 de agosto de 2021).
- IPCC, 2021, Climate Change 2021: The Physical Science Basis: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/> (Acesso em 22 de agosto de 2021).
- Juliani, C.; Assis, R.R de; Monteiro, L.V.S.; Fernandes, C.M.D.; Martins, J.E.Z. da S.; Costa, J.R.C. e. 2021. Gold in Paleoproterozoic (2.1 to 1.77 Ga) Continental Magmatic Arcs at the Tapajós and Juruena Mineral Provinces (Amazonian Craton, Brazil): A New Frontier for the Exploration of Epithermal–Porphyry and Related Deposits. Minerals 2021, 11, 714. <https://doi.org/10.3390/min11070714>.
- Juliani, C.; Monteiro, L.V.S.; Fernandes, C.M.D. 2016. Potencial mineral: Cobre. In: Melfi, A.J., Misi, A., Campos, D.d.A., Cordani, U.G. (Eds) Recursos Minerais no Brasil: Problemas e Desafios. Academia Brasileira de Ciências: Rio de Janeiro, Brazil, Vol. 1, p. 134–154.
- Juliani, C.; Vasquez, M.L.; Klein, E.L.; Villas, R.N.N.; Echeverri-Misas, C.M.; Santiago, E.S.B.; Monteiro, L.V.S.; Carneiro, C.C.; Fernandes, C.M.D.; Usero, G. 2014. In: Silva,

- M.G., Rocha Neto, M.G., Jost, H., Kuyumajian, R.M. (Eds) Metalogenia da Província Tapajós. In Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras. CPRM—Serviço Geológico do Brasil: Belo Horizonte, Brasil, Vol. 1, p. 229–268.
- Komp, 2016. How do solar panels work? – Richard Komp: <https://www.youtube.com/watch?v=xKxrkht7CpY> (Acesso em setembro de 2021).
- madehow.com, 2021, Wind Turbine: <http://www.madehow.com/Volume-1/Wind-Turbine.html> (Acesso em 10 de novembro de 2021).
- Lacal-Arantequi, R. 2015. Materials use in electricity generators in wind turbines e state-of-the-art and future specifications. Journal of Cleaner Production, 87: 275-283.
- Manberger, André; Stenqvist, Bjorn 2018. Global metal flows in the renewable energy transition: Exploring the effects of substitutes, technological mix and development. Lund, Suécia. [<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.056>].
- MIT News, 2011, Shining brightly - Vast amounts of solar energy radiate to the Earth constantly, but tapping that energy cost-effectively remains a challenge: <https://news.mit.edu/2011/energy-scale-part3-1026> (Acesso em 25 de outubro de 2021).
- Nexo, 2021, Agropecuária e uso da terra são 61,6% das emissões brasileiras: <https://www.nexojornal.com.br/grafico/2021/11/08/Agropecu%C3%A1ria-e-uso-da-terra-s%C3%A3o-616-das-emiss%C3%B5es-brasileiras> (Acesso em novembro em 2021).
- Nikkei Asia, 2019, China's solar panel makers top global field but challenges loom: <https://asia.nikkei.com/Business/Business-trends/China-s-solar-panel-makers-top-global-field-but-challenges-loom> (Acesso em 04 de novembro de 2021).
- Observatory of Economic Complexity, 2019. Refined Copper: <https://oec.world/en/profile/hs92/refined-copper> (Acessado em outubro de 2021).
- Okuno, 2019, Rejeitos radioativos: <https://jornal.usp.br/artigos/rejeitos-radioativos/> (Acesso em setembro de 2021).
- Paranapanema S.A., 2019, Relatório de Sustentabilidade 2018: <https://www.paranapanema.com.br/Download.aspx?Arquivo=4UjTNoDSDYeNJwfgGVDLrg==> (Acesso em outubro de 2021).
- Portal Solar, 2014, Vantagens e Desvantagens do Painele de Filme Fino: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/painel-solar/vantagens-e-desvantagens-do-painel-de-filmefino.html> (Acesso em 20 de outubro de 2021).
- Ribeiro, J. 2001, Sumário Mineral Brasileiro 2001: Cobre: https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2001/cobre_revisado.pdf (Acesso em outubro de 2021).
- Rocio et al, 2012, Perspectivas atuais da indústria de cobre no Brasil: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/1481/1/A%20Set.36_Perspectivas%20atuais%20da%20ind%20c3%bastria%20de%20cobre_P.pdf (Acesso em outubro de 2021).
- Silva et al., 2019. COBRE: PRODUÇÃO INDUSTRIAL E APLICAÇÕES: <http://static.sites.sbq.org.br/quimicanova.sbq.org.br/pdf/AR20190249.pdf> (Acesso em outubro de 2021).
- Stepp & Atkinson. 2012. Green Mercantilism: Threat to the Clean Energy Economy. The Information Technology & Innovation Foundation, Washington D.C., 2012.

- S&P Global, 2020, Solar-driven silver demand set to dim as sector innovates: <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/solar-driven-silver-demand-set-to-dim-as-sector-innovates-60533352> (Acesso em 20 de outubro de 2021).
- The Solar Labs, 2020, The Journey of an Element that converts Solar energy into Electricity: <http://blog.thesolarlabs.com/2020/10/14/element-converts-solar-energy-into-electricity/> (Acesso em 07 de novembro de 2021).
- Tamoghna S. & Sasikala, A. 2014. Design of an Electric Arc Furnace for Fused Quartz Industry. International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT), V15(3),153-156. ISSN:2231-5381. www.ijettjournal.org. published by seventh sense research group.
- USGS, 2021, Mineral Commodity Summaries 2021: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021.pdf> (Acesso em agosto de 2021).
- US Department of Energy, 2021, How a Wind Turbine Works - Text Version: <https://www.energy.gov/eere/wind/how-wind-turbine-works-text-version> (Acesso em 26 de outubro de 2021).
- Windpower Monthly News Magazine. Knebel, v. 19, 2003.
- World Resources Institute, 2021, Mudanças climáticas alarmantes: veja 5 grandes resultados do relatório do IPCC: <https://wribrasil.org.br/pt/blog/clima/ipcc-relatorio-mudancas-climaticas-2021> (Acesso em 14 de outubro de 2021).