

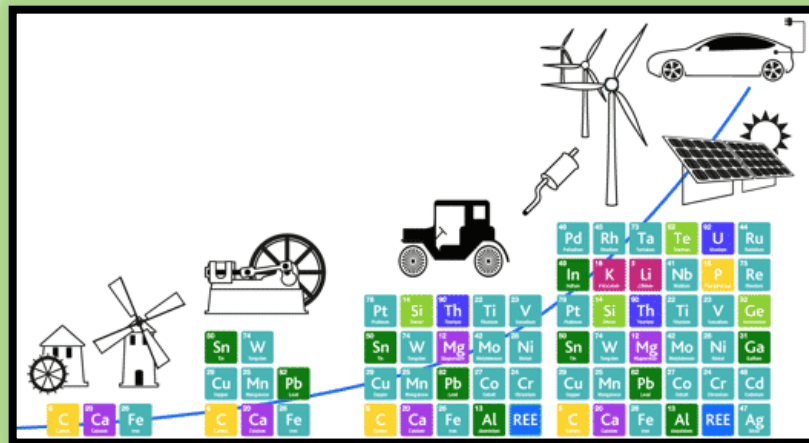


ATLÂNTICA

Instituto Universitário

Mestrado em Engenharia de Materiais

Materiais críticos para a transição energética: análise global e implicações ambientais



Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia de Materiais

Elaborado por:
Thayany Costa Paiva

Orientador:
Prof. Dr. Tessaleno Devezas

Barcarena

Julho de 2024



ATLÂNTICA

Instituto Superior Universitário

Mestrado em Engenharia de Materiais

Materiais críticos para a transição energética: análise global e
implicações ambientais

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia de Materiais

Elaborado por:
Thayany Costa Paiva

Orientador:
Prof. Dr. Tessaleno Devezas

Barcarena

Julho de 2024

Agradecimentos

Este trabalho dedico primeiramente a Deus, por sempre estar presente em minha vida, me dando forças e encorajando todos os dias nesta longa caminhada. Pois sem o senhor, sei que jamais teria conseguido chegar até aqui.

Aos meus pais, Vércio de Oliveira Paiva (*In memoriam*) e Silvana Costa Paiva, por ter me ensinado o princípio do conhecimento a Deus e da vida. Obrigada, mamãe, por ser minha inspiração de mãe, mulher, professora, amiga, e sobretudo me ensinaste a ser forte e não desistir independentemente das circunstâncias.

Ao meu esposo, Ronald Pereira, por sempre me apoiar e acreditar nos meus sonhos e objetivos. Obrigada pelo seu apoio, paciência, cumplicidade, amizade e força. Foste meu apoio e base todo esse tempo.

Minha filha Rebeka Pereira, você sem dúvidas me dá forças todos os dias para eu prosseguir e tentar ser minha melhor versão. Obrigada por ser tão paciente e compreensiva. Espero um dia, deixar o meu legado para você, e com este, prosseguireis e lembrares que o mais importante é avançar e nunca desistir, mesmo quando o cenário não for o mais favorável.

Mário São Bento e Valnizia Paiva, meus tios, sou muito grata por serem tão presentes em minha vida. Se hoje cheguei onde estou, é graças primeiramente a Deus, segundo a vocês. Pois um dia acreditaram no meu potencial e desde então caminham comigo me amparando e auxiliando neste meu percurso.

Meu orientador Prof. Dr. Tessaleno Devezas, obrigada pelo seu auxílio, orientação e paciência. Agradeço por todos os conhecimentos transmitidos, aprendi imenso consigo ao longo dos projetos que já fizemos juntos. Os seus ensinamentos levarei comigo para onde eu for, e sempre me lembrarei o quão importante fostes em minha vida e caminhada acadêmica.

Resumo

As chamadas fontes de energias renováveis, nomeadamente energia solar e eólica, assim como o uso em larga escala das baterias para veículos elétricos, navios e aeronaves, levantam uma série de questões, principalmente sobre a quantidade de materiais críticos utilizados para implementação dos mesmos. Embora todos os materiais sejam fundamentais devido à sua ampla utilização em diversos fins, é possível identificar que alguns destes minerais possuem um nível de criticidade superior a outros. Por exemplo, o cobalto, cobre, níquel, lítio, índio e terras raras são considerados minerais críticos devido à sua importância estratégica para diversos setores, especialmente para tecnologia, informação, indústria e segurança. No entanto, a disponibilidade desses materiais pode apresentar riscos de interrupção ou escassez, seja porque a extração e o processamento estão concentrados em regiões ou países específicos, ou porque sua obtenção requer esforços significativos, como também alguns destes materiais são subprodutos e dependem da mineração do mineral principal. Além disso, os preços desses materiais tendem a sofrer grandes flutuações devido a desequilíbrios entre oferta e procura.

Ao explorar a complexidade da transição para uma neutralidade carbónica global, este tema poderá contribuir significativamente para a compreensão dos impactos ambientais, sociais, estruturais e económicos envolvidos. É fundamental investigar como a procura por recursos minerais críticos para energias renováveis e baterias pode influenciar a sustentabilidade dessas tecnologias e identificar as estratégias necessárias para lidar com possíveis desafios, garantindo uma transição justa e equitativa.

Palavras-chave:

Energias renováveis; Impacto ambiental; Minerais críticos; Baterias.

Abstract

The so-called renewable energy sources, namely solar and wind energy, as well as the large-scale use of batteries for electric vehicles, ships and aircraft, raise a few questions, mainly about the number of critical materials used to implement them. Although all materials are fundamental due to their wide use for various purposes, it is possible to identify that some of these minerals have a higher level of criticality than others. For example, cobalt, copper, nickel, lithium, indium and rare earths are considered critical minerals due to their strategic importance for various sectors, especially technology, information, industry and security. However, the availability of these materials can present risks of interruption or scarcity, either because extraction and processing are concentrated in specific regions or countries, or because obtaining them requires significant effort, as well as because some of these materials are by-products and depend on the mining of the main mineral. In addition, the prices of these materials tend to fluctuate greatly due to imbalances between supply and demand.

By exploring the complexity of the transition to global carbon neutrality, this topic could make a significant contribution to understanding the environmental, social, structural and economic impacts involved. It is essential to investigate how the demand for critical mineral resources for renewable energies and batteries can influence the sustainability of these technologies and to identify the strategies needed to deal with possible challenges, ensuring a just and equitable transition.

Key words:

Renewable energies; Environmental impact; Critical minerals; Batteries.

Índice

Agradecimentos	iv
Resumo	v
Abstract.....	vi
Índice de Figuras.....	ix
Índice de Tabelas.....	xi
Lista de Abreviaturas	xii
Introdução	1
Capítulo 1.....	4
A transição energética	4
1.1 Considerações gerais	4
1.2 A lentidão da transição energética.....	7
Capítulo 2.....	13
Descrição geral sobre as energias renováveis.....	13
2.1 Energia Eólica	13
2.2 Energia Solar	25
2.3 Baterias.....	30
Capítulo 3.....	35
O conceito de materiais críticos.....	35
Capítulo 4.....	39
Análise sobre a procura dos materiais críticos.....	39
4.1 Cobalto	40
4.1.1 Aplicabilidade do cobalto	40
4.1.2 O cobalto na transição energética.....	41
4.2 Cobre	45
4.2.1 Aplicabilidade do cobre	46
4.2.2 O cobre na transição energética.....	46
4.3 Níquel.....	51
4.3.1 Aplicabilidade do níquel.....	51
4.3.2 O níquel na transição energética.....	53
4.4 Lítio	58
4.4.1 Aplicabilidade do lítio	58
4.2.2 – O Lítio na transição energética.....	59
4.5 Índio	63
4.5.1 Aplicabilidade do índio.....	63
4.5.2 O índio na transição energética	64

4.6 Terras Raras.....	69
4.6.1 Aplicabilidade das terras raras.....	75
4.6.2 As terras raras na transição energética.....	78
Capítulo 5.....	80
Reciclagem.....	80
5.1 Reciclagem do Cobalto	82
5.2 Reciclagem do Cobre	84
5.3 Reciclagem do Níquel.....	86
5.4 Reciclagem do Lítio	87
5.4 Reciclagem do índio.....	91
5.5 Reciclagem das terras raras	92
Capítulo 6.....	94
Conclusão.....	94
Bibliografia	100

Índice de Figuras

Figura 1-Diagrama comparativo dos materiais usados em tecnologias de energia “limpa” e tecnologias convencionais.....	3
Figura 2-Consumo mundial de energia em TWh.....	9
Figura 3-Quota mundial do consumo de energia por fonte desde 1990	10
Figura 4- Percentagem de energia primária proveniente de fontes de baixo teor de carbono	11
Figura 5-Produção de energias renováveis ao longo dos anos	11
Figura 6-Capacidade eólica instalada acumulada a nível mundial de 1996 a 2023	14
Figura 7- Capacidade cumulativa de energia eólica onshore e offshore a nível mundial	15
Figura 8-Turbinas eólicas de eixo horizontal.....	16
Figura 9-Principais componentes de um aerogerador de eixo horizontal.....	16
Figura 10-Materiais utilizados em turbinas eólicas	22
Figura 11-Capacidade cumulada de energia solar fotovoltaica instalada globalmente entre 2000 e 2022.....	25
Figura 12-Materiais utilizados nas tecnologias solares fotovoltaicas.....	27
Figura 13-Comparação do uso de minerais entre veículos a combustão e veículos elétricos	32
Figura 14-Materiais comumente utilizados nas baterias.....	33
Figura 15-Evolução das vendas globais de automóveis elétricos nos últimos anos.....	34
Figura 16-Círculo do companheirismo metálico	38
Figura 17- Aplicabilidade do cobalto.....	41
Figura 18-Histórico e projeção futura da produção global do cobalto ao longo dos anos	42
Figura 19-Volatilidade do preço do cobalto no prazo 1985 - 2023 (média anual).....	44
Figura 20-Histórico e projeção da produção mundial de cobre.....	47
Figura 21-procura do cobre em um futuro movido por energias renováveis.....	48
Figura 22-Volatilidade do preço do cobre entre o período de 1985 a 2023 (média anual)..	50
Figura 23- Aplicabilidade do Níquel	53
Figura 24-Histórico e projeção da produção mundial do níquel a partir 1990	54
Figura 25-Volatilidade do preço do níquel no período de 1985 a 2023 (média anual)...	57
Figura 26-Produção mundial e respetiva projeção futura do lítio a partir de 2017.....	60
Figura 27-Histórico e projeção futura das reservas globais de lítio, entre 2010 e 2030..	61
Figura 28-Comportamento do preço do lítio nos últimos anos (2010 - 2023 - média anual).	63
Figura 29-Histórico da produção do Índio desde 1990, e respetiva projeção futura.....	65
Figura 30-Comportamento do preço do índio nos últimos anos (1970 - 2024).....	69
Figura 31-Tabela periódica com destaque aos elementos terras raras	70
Figura 32-Produção mundial de terras raras desde 2015.....	72

Figura 33- Percentagem de produção de terras raras por país em 2023.	74
Figura 34-Percentagem das terras raras mais produzidas em 2020.	74
Figura 35-Principais aplicações de materiais críticos.....	77
Figura 36-Comportamento dos preços dos óxidos do disprósio e neodímio entre o período de 2009 a 2023.....	78
Figura 37-Redução da procura primária por minerais críticos.....	81
Figura 38-Síntese dos recursos secundários do cobalto com os respetivos processos de reciclagem.....	83
Figura 39-Cadeia de valor simplificada do cobre. Figura adaptada da.....	85
Figura 40-Visão geral do fluxograma de reciclagem das baterias de íões de lítio comparando os processos hydrometalurgia e pirometalurgia.....	90

Índice de Tabelas

Tabela 1-Vantagens e desvantagens das turbinas eólicas de eixo horizontal.....	17
Tabela 2-Estimativa da utilização de materiais em t/GW para diferentes tipos de turbinas eólicas	20
Tabela 3- Estimativa da procura futura de neodímio, praseodímio, disprósio e térbio ..	23
Tabela 4-Cenário de baixa procura para os materiais: neodímio, praseodímio, disprósio e térbio e perspetivas futuras.	24
Tabela 5-Cenário de alta procura para os materiais: neodímio, praseodímio, disprósio e térbio e perspetivas futuras.	24
Tabela 6-Principais características dos painéis solares.....	26
Tabela 7- Estimativa da intensidade de materiais necessários para fabricação de painéis fotovoltaicos em diferentes cenários)	28
Tabela 8-Quantidade de materiais contidos nas baterias de iões de lítio.....	32
Tabela 9-Quantidade de cobre utilizada na fabricação das energias renováveis (Venditti, 2021).....	49
Tabela 10-Propriedades e aplicações do níquel	52
Tabela 11-Exemplos de uso, aplicação e funcionalidade de alguns materiais críticos ...	75
Tabela 12-Alguns metais importantes de terras raras e os preços dos respetivos óxidos	77

Lista de Abreviaturas

- (LIBs) - Baterias de íões-lítio
- (CFL) - Lâmpada fluorescente compacta
- (RC) - Conteúdo reciclado
- (ICE) - Combustão interna
- (LDS) - Cenário de baixa procura
- (MDS) - Cenário de média procura
- (HDS) - Cenário de alta procura
- (CIGS) - Seleneto de cobre índio e gálio
- (CdTe) - Telureto de cádmio
- (CO₂) - Dióxido de carbono
- (REE) - Elementos terras raras
- (LFP) - Fosfato de ferro-lítio
- (RKEF) - Forno elétrico rotativo
- (EOL) - Fim de vida
- (GB-DFIG) - Gerador de indução de dupla alimentação com caixa de velocidades
- (GB-PMSG) - Gerador síncrono de ímanes permanentes com caixa de velocidades
- (DD-PMSG) - Gerador síncrono de ímanes permanentes de acionamento direto
- (DD-EESG) - Gerador síncrono de acionamento direto excitado eletricamente
- (GW) - Gigawatts
- (IEA) - International Energy Agency
- (LED) - Diodos emissões de luz
- (LCD) - Monitor de cristal líquido
- (LFL) - Lâmpada fluorescente linear
- (HPAL) - Lixiviação ácida de alta pressão
- (MW) - Megawatts
- (MCI) - Motor a combustão interna
- (NiMH) - Níquel-hidreto metálico
- (NdFeB) - Neodímio-Ferro-Boro
- (NDS) - National defense stockpile

(LCO) - Óxido de lítio-cobalto
(ITO) - Óxido de índio e estanho
(LMO) - Óxido de lítio-manganês
(NCA) - Óxido de lítio-alumínio níquel-cobalto
(NMC) - Óxido de lítio-níquel-manganês-cobalto
(NO_x) - Óxido de nitrogénio
(SO_x) - Óxidos de enxofre
(IPCC) - Painel intergovernamental sobre as alterações climáticas
(PVs) - Painéis fotovoltaicos
(PFV) - Painéis solares fotovoltaicos
(KW) - Quilowatt
(RDC) - República Democrática do Congo
(a-Si) - Silício amorfo
(c-Si) - Silício cristalino
(PV) - Solar fotovoltaica
(SDS) - Cenário de Desenvolvimento Sustentável
(VAWT) - Turbina Eólica de Eixo Vertical
(HAWT) - Turbina Eólica de Eixo Horizontal
(UNU) - Universidade das Nações Unidas
(USGS) - United States Geological Survey
(EV) - Veículo elétrico
(Wh) - Watt-hora

Introdução

Diante da situação ambiental atual e todas as consequências que o planeta vem sofrendo, a busca por fontes alternativas na matriz energética e por combustíveis mais sustentáveis tem ganhado espaço a nível mundial (Borges et. al, 2019). O que se espera, de modo global, é que seja possível garantir o desenvolvimento económico e social sem que ocorra uma agressão maior ao meio ambiente e à saúde humana.

A adoção de energias alternativas tem sido amplamente procurada desde a década de 1970, quando as crises do petróleo levaram diversos países a procurar a segurança no fornecimento de energia e a redução da dependência da importação de combustíveis fósseis (Pacca, 2013). Logo em seguida, em 1974 foi fundada a *International Energy Agency (IEA)* na sequência dessas perturbações nos mercados globais de petróleo que abalaram a economia mundial. Atualmente sua missão principal tem sido promover o fornecimento de energia segura e acessível (IEA, 2021), assim como identificar e direcionar os principais caminhos a seguir nessa transição energética de forma segura e cautelosa.

Os combustíveis fósseis têm desempenhado um papel crucial no desenvolvimento económico global ao longo de décadas. Desde a revolução industrial, o carvão, petróleo e o gás natural têm sido as principais fontes de energia que impulsionaram a industrialização, urbanização e o crescimento económico globalmente. Veremos mais à frente que essa utilização em massa dos combustíveis fósseis permanece até os dias atuais. No entanto, devido aos problemas ambientais (mudanças climáticas, gases de efeito estufa, aumento da temperatura média global), a procura por fontes alternativas energéticas têm-se intensificado cada vez mais, de forma a tentar encontrar uma solução para todos esses problemas.

Este estudo analisa as implicações dos materiais para a transição energética, que implicam no uso massivo de baterias, turbinas eólicas, e painéis solares, que para sua implementação requerem uma elevada quantidade de materiais. Embora dependamos de todos os materiais em diferentes setores industriais, é importante reconhecer que cada tipo de material possui suas propriedades e características específicas que o tornam adequados para certas aplicações. Visto isso, será realizado uma análise global de alguns materiais específicos, tais como cobalto, cobre, níquel, lítio, índio e terras raras.

A criticidade do cobalto, cobre, níquel, lítio, índio e terras raras está relacionada com a alta procura dos mesmos, e por serem considerados estratégicos para diversos setores, principalmente ligados a tecnologia, informação, indústria e segurança, mas cuja oferta apresenta riscos de interrupção ou escassez, pois podem ter extração e processamento concentrados em determinados países, ou porque requerem um esforço de extração, mineração e processamento significativo, e os preços têm apresentado grandes oscilações e refletem desequilíbrios entre a oferta e a procura, para além de alguns destes serem subproduto da mineração de outros metais, como é o caso do índio, cobalto, e terras raras.

Um sistema de energia alimentado por tecnologias de “energia limpa”¹ difere profundamente de um alimentado por recursos tradicionais de hidrocarbonetos. Construir painéis solares fotovoltaicos (PFV), turbinas eólicas e veículos elétricos (EVs) geralmente requer mais minerais do que seus equivalentes baseados em combustíveis fósseis (IEA, 2021). Um carro elétrico típico requer seis vezes mais recursos minerais do que um carro convencional, e um parque eólico terrestre requer nove vezes mais recursos minerais do que uma fábrica a gás (IEA, 2021). Desde 2010, a quantidade média de minerais necessários para uma nova unidade de geração de energia aumentou 50% à medida que as participações das energias renováveis aumentaram (IEA, 2021). Os tipos de recursos minerais utilizados variam de acordo com a tecnologia. Lítio, níquel, cobalto, manganês e grafite são cruciais para o desempenho, longevidade e densidade de energia de uma bateria. Elementos de terras raras são essenciais para ímãs permanentes que são vitais para turbinas eólicas e motores para carros elétricos. As redes de eletricidade necessitam de uma enorme quantidade de cobre e alumínio, sendo o cobre a pedra angular de todas as tecnologias relacionadas com geração de eletricidade.

A mudança para um sistema de “energia limpa” deve gerar um enorme aumento nas necessidades desses minerais, o que significa que o setor de energia está emergindo como uma força preocupante nos mercados minerais.

Num cenário que atenda às metas do Acordo de Paris, a participação das tecnologias de “energia limpa” na procura total aumentará significativamente nas próximas duas décadas para mais de 40% para elementos como o cobre e terras raras, 60-70% para níquel e

¹ Energia limpa está entre aspas pelo fato de haver muitas implicações ambientais, sociais e econômicas que nos faz refletir se essa fonte energética é realmente limpa. Ou se a mesma poderá prejudicar o cenário global.

cobalto e quase 90% para o lítio (IEA, 2021). Conforme apresentado na figura 1, a rápida implantação de tecnologias de “energia limpa” como parte da transição energética implica um aumento significativo na procura por minerais.

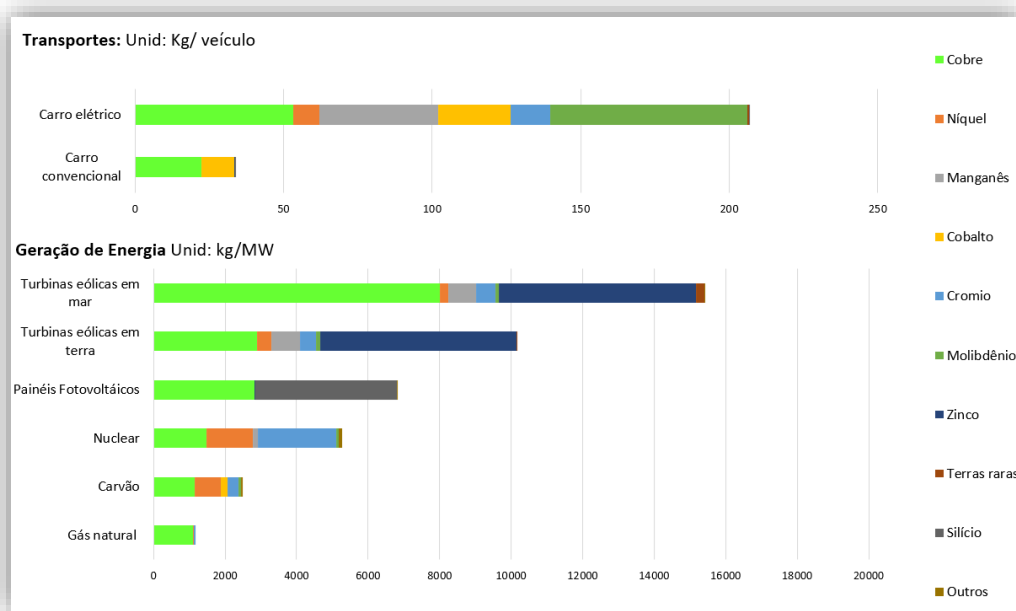


Figura 1-Diagrama comparativo dos materiais usados em tecnologias de energia “limpa” e tecnologias convencionais (IEA, 2021)

O conjunto de esforços necessários para alcançar as metas do Acordo de Paris (estabilização do clima em “bem abaixo de 2°C de aumento da temperatura global”, como no *Sustainable Development Scenario* da AIE [SDS]) significará uma quadruplicação dos recursos minerais para tecnologias de “energia limpa” até 2040 (IEA, 2021).

Capítulo 1

A transição energética

1.1 Considerações gerais

A transição energética é uma mudança de paradigma na forma como a sociedade gera e consome energia. Historicamente, a humanidade tem usado combustíveis fósseis, como o petróleo, carvão e o gás natural, como principais fontes primárias de energia. No entanto, com o aumento da conscientização ambiental, mudanças climáticas, aumento da temperatura global, emissões de gases de efeito estufa (GEE) e consumo intensivo dos recursos minerais, encontrar alternativas mais sustentáveis será imprescindível para um futuro mais sustentável e ecológico.

De forma a minimizar esses impactos, é necessário de fato, mudar a forma como produzimos, distribuimos e consumimos energia. Sendo assim, a mudança para fontes de energias renováveis e “limpas”, surge como uma “solução viável” para reduzir a dependência dos combustíveis fósseis. Quando me refiro “limpa” entre aspas, é pelo fato de haver imensas questões interligadas relacionadas com a real integridade dessas novas fontes energéticas. Veremos mais a frente, que as fontes de energia rotuladas como "limpas" também têm impactos ambientais, sociais e económicos, seja na extração, produção, transporte ou no descarte. Por isso, é essencial considerar o ciclo de vida completo das tecnologias energéticas e entender plenamente seu impacto total no meio ambiente.

As fontes de energias renováveis são aquelas que se renovam naturalmente, sem se esgotarem com o uso (United Nations, 2024). Algumas das principais fontes de energias renováveis incluem:

- Energia solar: obtida a partir da radiação do sol, pode ser convertida em eletricidade por meio de painéis solares.
- Energia eólica: gerada a partir do vento, pode ser convertida em eletricidade por meio de turbinas eólicas.
- Energia hidroelétrica: gerada a partir da força da água em movimento, é uma das formas mais antigas de energia renovável e é obtida por meio de centrais hidroelétrica.

- Biomassa: obtida a partir de materiais orgânicos, como madeira, resíduos agrícolas e dejetos de animais, pode ser convertida em energia térmica ou elétrica.
- Geotérmica: obtida a partir do calor interno da terra, pode ser convertida em eletricidade por meio de centrais geotérmicas.
- Energia das marés: gerada a partir do movimento das marés, pode ser convertida em eletricidade por meio de turbinas.

Essas são algumas das principais fontes de energias renováveis, mas existem outras, como a energia solar térmica, que utiliza a radiação solar para aquecer um fluido, geralmente água, para consumo industrial ou residencial (EIA, 2024). A escolha da fonte de energia depende de alguns fatores como localização geográfica, disponibilidade de recursos e condições climáticas.

Embora tenha citado todas essas fontes de energias renováveis, neste trabalho serão abordados em pormenor apenas os sistemas de energia eólico e solar, assim como as baterias de íons de lítio. É importante que os governos, empresas e sociedade civil compreendam profundamente a importância e os desafios dessa mudança radical na matriz energética. Podemos citar alguns desses desafios que podem atrasar o processo de crescimento dessas novas tecnologias renováveis.

1. Investimentos necessários: A transição energética requer grandes investimentos em novas tecnologias, infraestruturas e modelos de negócios.
2. Dependência de recursos naturais: Algumas fontes de energias renováveis, necessitam de uma grande quantidade de minerais críticos para sua produção.
3. Integração com a infraestrutura existente: A integração de fontes de energia renovável na infraestrutura existente pode ser complexa e pode exigir a atualização de sistemas de transmissão e distribuição de energia. Isso requer investimentos significativos, o que muitas vezes é um desafio para os países em desenvolvimento e emergentes.
4. Resistência à mudança: A transição energética pode encontrar resistência de indústrias tradicionais, grupos de interesses e consumidores que estão muito habituados às fontes de energia convencionais.

5. Impactos sociais: A transição energética pode ter impactos sociais significativos, incluindo a perda de empregos em setores de combustíveis fósseis e a necessidade de formar trabalhadores em novas habilidades e profissões. Ou até mesmo a mão de obra barata e insalubridade vivenciada por alguns mineradores na extração de minerais.
6. Acesso à energia: A transição energética pode agravar a desigualdade social e económica se não houver esforços para garantir que todos tenham acesso à energia “limpa” a preços acessíveis.

Desde o momento em que houve uma conscientização a nível global que o sistema energético precisava de sofrer modificações consideráveis para o equilíbrio planetário e mitigação dos gases de efeito estufa (GEE), vários acordos e iniciativas vêm sendo tomadas pelos governos a nível planetário. Dentre elas, podemos citar o Acordo de Paris, um acordo internacional sobre mudança climática que foi adotado em dezembro de 2015 durante a 21ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (COP21) realizada em Paris (IRENA, 2023). O objetivo principal deste acordo é limitar o aumento da temperatura global em até 2°C acima dos níveis pré-industriais, e se possível em 1,5°C, mediante a redução das emissões de gases de efeito estufa até 2050. Para alcançar esse objetivo, os países signatários concordaram em apresentar e cumprir compromissos voluntários e nacionais para reduzir as emissões de GEE (IRENA, 2023).

O Acordo de Paris foi adotado por 195 países e entrou em vigor em novembro de 2016. Atualmente, 191 países são signatários do acordo. Os países signatários são obrigados a apresentar relatórios sobre as suas emissões de gases de efeito estufa e sobre as medidas que estão a ser tomadas para as reduzir. Além disso, os países devem rever e aumentar as suas metas de redução de emissões a cada cinco anos (IRENA, 2023). O atual acordo é considerado um marco importante na luta global contra as mudanças climáticas, já que pela primeira vez a comunidade internacional se comprometeu a trabalhar em conjunto para limitar o aquecimento global e proteger o meio ambiente.

A *International Renewable Energy Agency (IRENA)* também desempenha um papel importante na implementação do Acordo de Paris, pois a mesma é uma organização intergovernamental estabelecida em 2009 com o objetivo de promover a adoção e o uso

sustentável de fontes de energias renováveis em todo o mundo. A *IRENA* trabalha em estreita colaboração com governos, organizações internacionais, empresas e outras partes interessadas para ajudar a acelerar a transição energética para um futuro energético mais sustentável. A mesma fornece análises, recomendações políticas, assistência técnica, capacitação aos países membros, condução de pesquisas e análises sobre tecnologias e políticas de energias renováveis, além de fornecer uma plataforma para os países partilharem as suas experiências e conhecimentos.

1.2 – A lentidão da transição energética

As questões climáticas são atualmente uma preocupação a nível global. E embora existam medidas e acordos internacionais para alcançar a tão sonhada neutralidade carbónica e a intensa implementação de energias renováveis, essa mudança ainda tem sido mais lenta do que o esperado (Devezas et al, 2023). Existem várias razões para o ritmo lento da transição energética. Uma delas é a forte dependência por combustíveis fósseis, que continuam a ser a principal fonte de energia globalmente, como veremos mais a frente na figura 2.

Essa forte dependência por combustíveis fósseis, está enraizada numa série de fatores interligados que abrangem desde questões históricas e económicas até aspetos tecnológicos e sociais. A revolução industrial, iniciada no século XVIII, marcou o início da dependência por combustíveis fósseis (Britannica, 2024). O carvão foi o principal combustível dessa era, alimentando máquinas a vapor, ferrovias e fábricas. Posteriormente, no século XX, intensificou-se o consumo de petróleo e gás natural, tornando-se a principal fonte energética, principalmente com a invenção do motor de combustão interna. A acessibilidade e a densidade energética destes combustíveis facilitaram o uso em transportes, indústrias e eletricidade (Globalsyde, 2022).

Ao longo de décadas, foram feitos investimentos massivos em infraestruturas de combustíveis convencionais, incluindo refinarias, redes de distribuição e veículos. Muitos países têm economias altamente dependentes da extração e exportação de petróleo. Em 2023, os Estados Unidos, a Rússia e a Arábia Saudita contribuíram coletivamente com 32,7 milhões de barris por dia para a produção global de petróleo (Venditti, 2024), sendo também são os maiores produtores de gás natural (Statista, 2024).

Do ponto de vista tecnológico, os combustíveis fósseis têm uma densidade energética elevada, tornando-os altamente eficientes para gerar energia. As tecnologias para extrair, refinar e utilizar esses combustíveis foram desenvolvidas e aprimoradas ao longo de décadas, criando um ciclo de dependência difícil de romper. O setor dos transportes, por exemplo, é fortemente dependente de derivados do petróleo, como a gasolina e o diesel, e a mudança para alternativas como veículos elétricos requer grandes investimentos em novas infraestruturas e tecnologias.

As forças ou pressões que atuam para o ritmo lento da adoção de energias alternativas podem ser vistas sob uma perspectiva tripla: sócio-psicológica, político-estratégico-territorial e técnica, conforme a abordagem de (Devezas et al, 2024).

Podemos observar que apesar de anos de discussões, políticas e investimentos no setor das energias renováveis, o cenário mundial não mudou significativamente, e as fontes de energia fóssil ainda mantêm uma quota superior a 80% na produção global de energia (Devezas et al, 2024).

Vejamos primeiro a evolução mundial da utilização de todo o conjunto de fontes de energias nos últimos trinta anos, desde a realização do primeiro IPCC (Painel Intergovernamental sobre as Alterações Climáticas) em Sundsvall, Suécia em agosto de 1990.

Conforme se pode observar na figura 2 apresenta o consumo mundial de energia em TWh considerando todas as fontes de energia, fósseis e não fósseis/renováveis, e a figura 3 mostra a respetiva quota. A figura 4 apresenta a evolução da quota de energia primária proveniente de fontes de baixo carbono, que é definida como a soma das fontes nucleares e renováveis. As fontes renováveis incluem a energia hidroelétrica, energia solar, energia eólica, energia geotérmica, energia das ondas e das marés e a biomassa (não estão incluídos os biocombustíveis tradicionais).

Como pode-se observar na figura 2, a produção global de energia não está estagnada, tendo crescido substancialmente nos últimos 30 anos - o consumo de petróleo cresceu 42%, o consumo de gás apenas duplicou e o consumo de carvão cresceu 73% até 2013, após o que se manteve relativamente constante, com uma quebra em 2020 (à semelhança das outras fontes), mas que, no entanto, parece regressar à trajetória anterior.

Este crescimento espantoso no consumo de energia foi demasiado rápido para as energias renováveis o acompanharem.

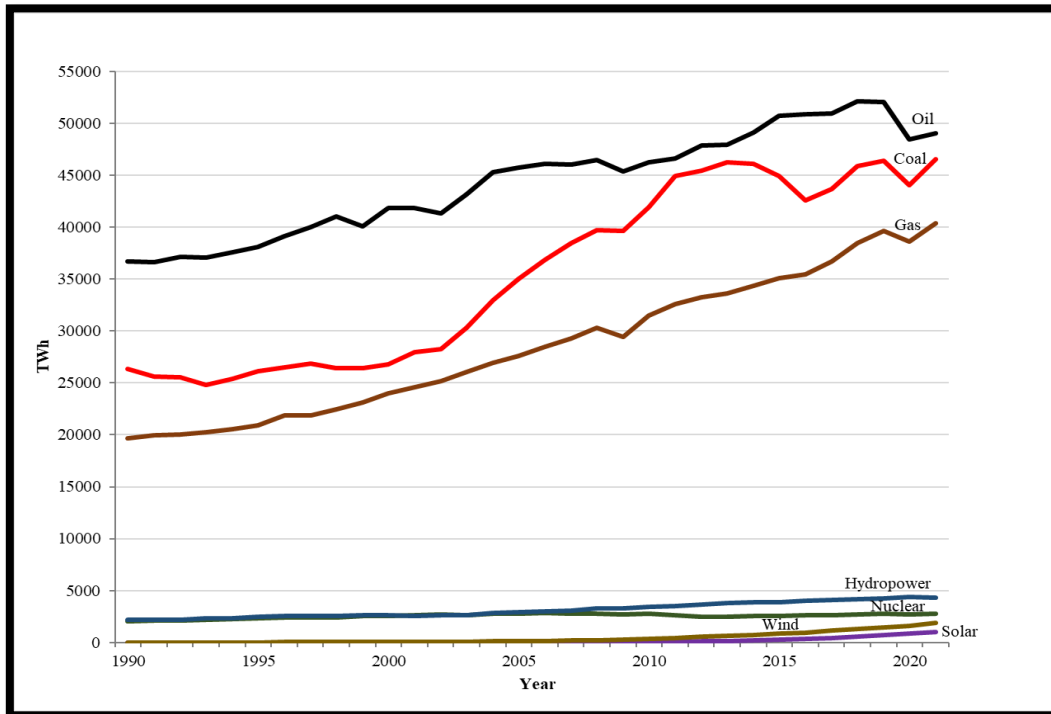


Figura 2-Consumo mundial de energia em TWh por fonte desde 1990 (Devezas et al. 2024)

A figura 3 permite-nos também chegar a algumas conclusões importantes. A informação que mais se destaca neste gráfico é o declínio expressivo da quota do petróleo no consumo de energia planetária, de 40% para cerca de 31%, uma redução de cerca de 22%. É importante observar que tal declínio não foi um caso de substituição energética; ver que a contribuição da quota do carvão houve flutuações, mas permaneceu aproximadamente constante, e a quota do consumo de gás apenas aumentou de 20 para 25% durante o mesmo período (Devezas et al., 2023). A contribuição de energia eólica e da energia solar para a quota global só cresceu significativamente após 2010, e a contribuição de ambos para a quota global ainda não atingiu os 10%. A principal razão para a queda observada no consumo de petróleo reside no desenvolvimento da eficiência tecnológica.

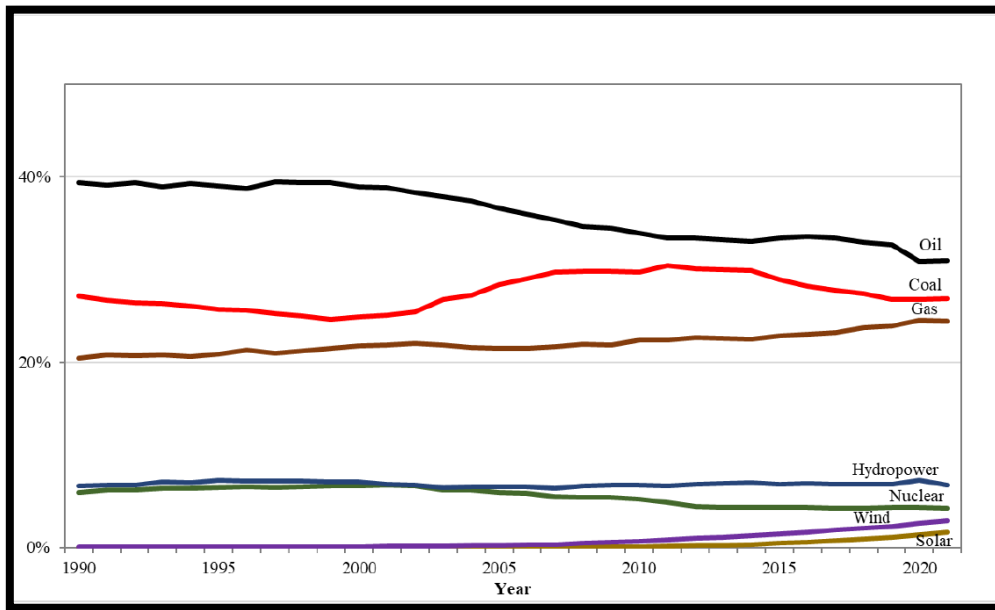


Figura 3-Quota mundial do consumo de energia por fonte desde 1990 (Devezas et al. 2024)

A figura 4 mostra o desdobramento da quota do consumo de energia primária a partir de fontes de baixo carbono. As fontes de baixo carbono são definidas como a soma das fontes nucleares e renováveis; importante salientar que a quota de dois dígitos que aparece na figura 4 deve-se principalmente à contribuição da energia hídrica e nuclear, ambas muito maiores do que a quota das outras energias renováveis consideradas em conjunto como também podemos verificar na figura 5. A partir da figura 2, podemos ver que a taxa de progresso para o consumo de energia primária desde os anos 90 não é impressionante. Em 1994 estávamos a obter cerca de 14% de fontes de baixo carbono, mas hoje, quase três décadas depois, a quota aumentou apenas 4%. A subida está de fato a acontecer, mas relativamente demasiado lentamente, provavelmente muito mais lentamente do que o esperado. O aumento observado, cerca de 28% desde 1990, implica uma taxa de crescimento anual de cerca de 0,93%, o que por sua vez significa que em 2030 poderemos atingir um, muito abaixo do pretendido pelo Acordo de Paris.

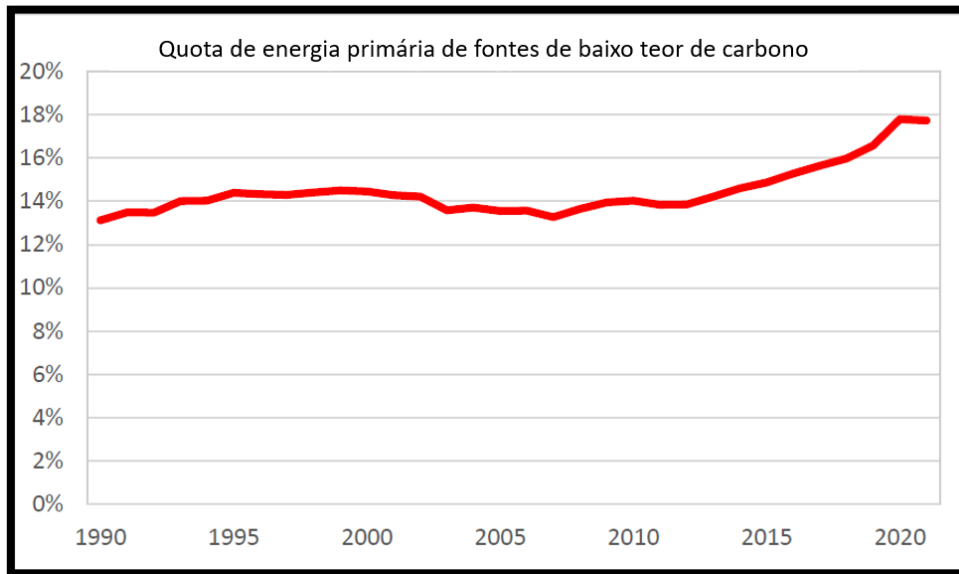


Figura 4- Percentagem de energia primária proveniente de fontes de baixo teor de carbono Devezas et al. (2024)

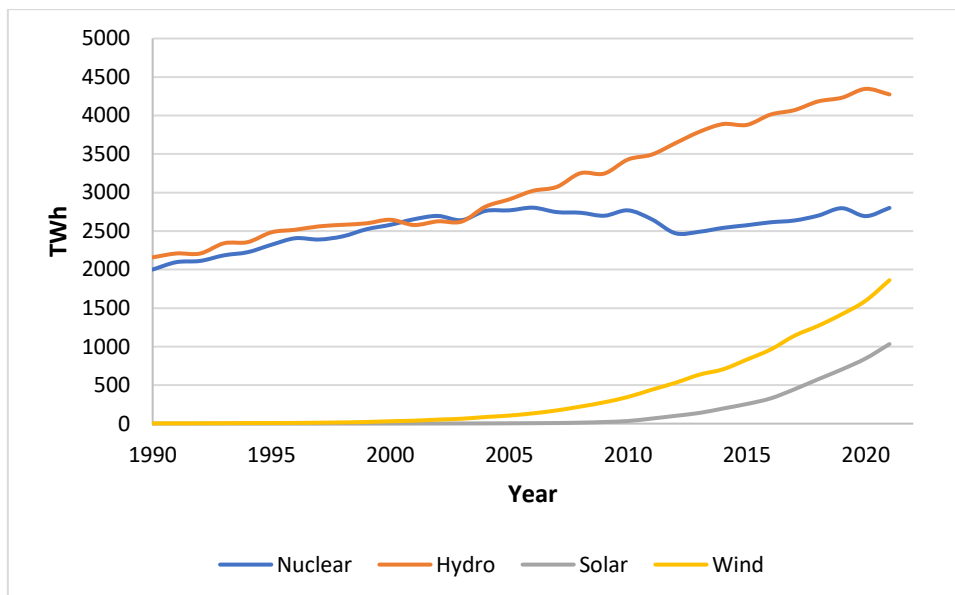


Figura 5-Produção de energias renováveis ao longo dos anos por fonte segundo (Devezas et al. 2024)

Vale salientar que as estimativas acima referidas sobre o crescimento da quota de fontes renováveis baseiam-se em pura extrapolação. (Devezas et al, 2024) acredita que só em 2075 a quota de energias renováveis mais nucleares poderia atingir 50%, ultrapassando então a quota de fontes fósseis.

Entre as razões apontadas por Devezas et al (2024) para a lentidão da transição energética destaca-se a extração e produção dos materiais críticos envolvidos nas novas tecnologias de geração de energia. De fato, os materiais são essenciais em todos os setores, não só para obtenção de energias renováveis, mas também para as tecnologias digitais, smart

phones, smart TVs, computadores, automóveis, aeronaves e etc. Nos capítulos 3 e 4 será abordado mais a fundo essa relevância, influencia, e disponibilidade dos materiais e minerais na crosta terrestre, assim como os mesmos podem ser afetados por essa obsessão de uma descarbonização acelerada, e esforço para não ultrapassar 1,5°C de aumento de temperatura global até 2050.

Capítulo 2

Descrição geral sobre as energias renováveis

Embora as energias renováveis tenham evoluído muito lentamente para poderem superar o uso massivo de combustíveis fósseis, a evolução e o uso dos painéis solares, turbinas eólicas e baterias de íões de lítio obtiveram um crescimento significativo ao longo dos últimos anos.

Junto com essa evolução, a procura de recursos minerais cresceu proporcionalmente. Será abordado mais a frente, em pormenores, que os tipos de recursos minerais utilizados variam de acordo com a tecnologia. Por exemplo, o lítio, cobalto e níquel desempenham um papel importante para as baterias, pois proporcionam maior desempenho, durabilidade e eficiência. Elementos de Terras Raras (REEs) são utilizados na fabricação de ímãs permanentes que são vitais para turbinas eólicas e veículos elétricos (EVs). Em relação aos painéis fotovoltaicos (PVs), os principais materiais empregues na fabricação dos mesmos são silício, índio, prata, cobre, entre outros que serão citados no tópico 2.2 de painéis solares.

Portanto, a medida que haja maior aumento na fabricação de baterias, painéis solares e turbinas eólicas, conseqüentemente haverá um aumento significativo na procura por esses materiais.

2.1 Energia Eólica

A energia eólica é uma forma de energia renovável que ganhou muita atenção e popularidade nos últimos anos devido ao seu potencial para fornecer energia “sustentável” e “limpa”. A energia eólica refere-se ao processo de produção de eletricidade a partir da energia cinética do vento. O movimento rotativo das pás é convertido em energia elétrica através de um gerador. Esta energia pode então ser utilizada para alimentar casas, empresas e indústrias.

A capacidade instalada associada a parques eólicos (figura 6) que produzem eletricidade em meio terrestre (onshore) e em meio marítimo (offshore) cresceu aproximadamente um fator de 169 vezes nos últimos vinte e sete anos, partindo de 6 GW em 1996 para aproximadamente 1017 GW em 2023 (IRENA, 2024).

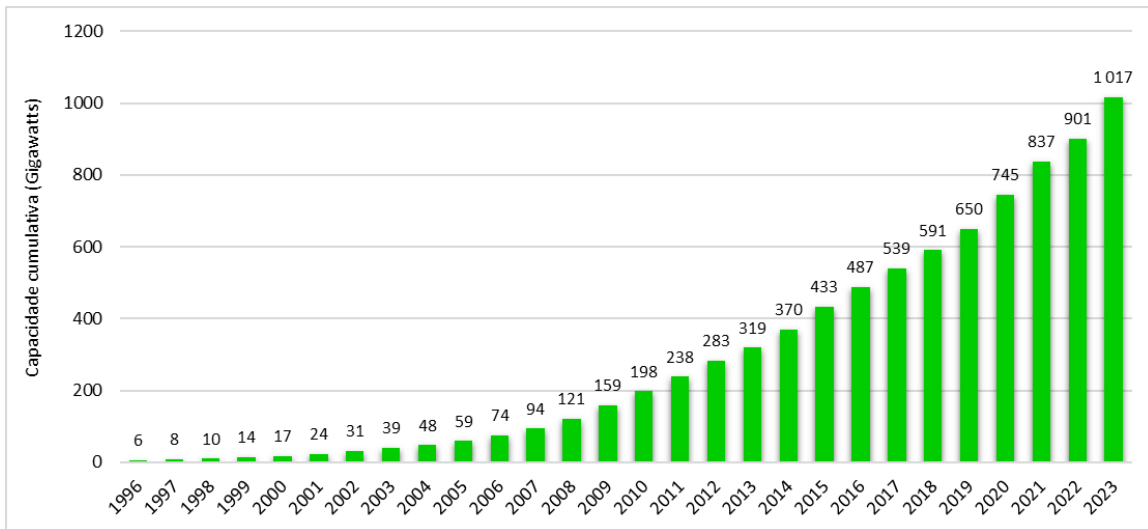


Figura 6-Capacidade eólica instalada acumulada a nível mundial de 1996 a 2023 (em Gigawatts) dados de (Fernández, 2023)

Mediante os dados expostos na figura 7, uma observação direta é que, atualmente, no mundo, a maior parte da energia eólica provém de parques onshore comparativamente a offshore. De acordo com a (IRENA, 2024), 944 GW (93%) provêm de parques onshore, ao passo que 72,6 GW (7%) provêm de parques offshore. A energia eólica onshore é uma tecnologia já bastante desenvolvida, presente em 115 países ao redor do mundo, enquanto a eólica offshore está em fase inicial de expansão, com capacidade presente em apenas 19 países (PCE, 2024).

No entanto, devido aos avanços tecnológicos e apoios políticos para as energias renováveis, a exploração no setor das turbinas offshore tem possibilitado um avanço significativo nos últimos anos. Os ventos em meio marítimo estatisticamente apresentam velocidades mais altas, são mais perenes e uniformes, fornecem maior densidade de energia, menores limitações espaciais e menor probabilidade de reclamações civis, quando comparado à energia eólica onshore, especialmente com relação à emissão de ruídos, poluição visual e ocupação de espaço.

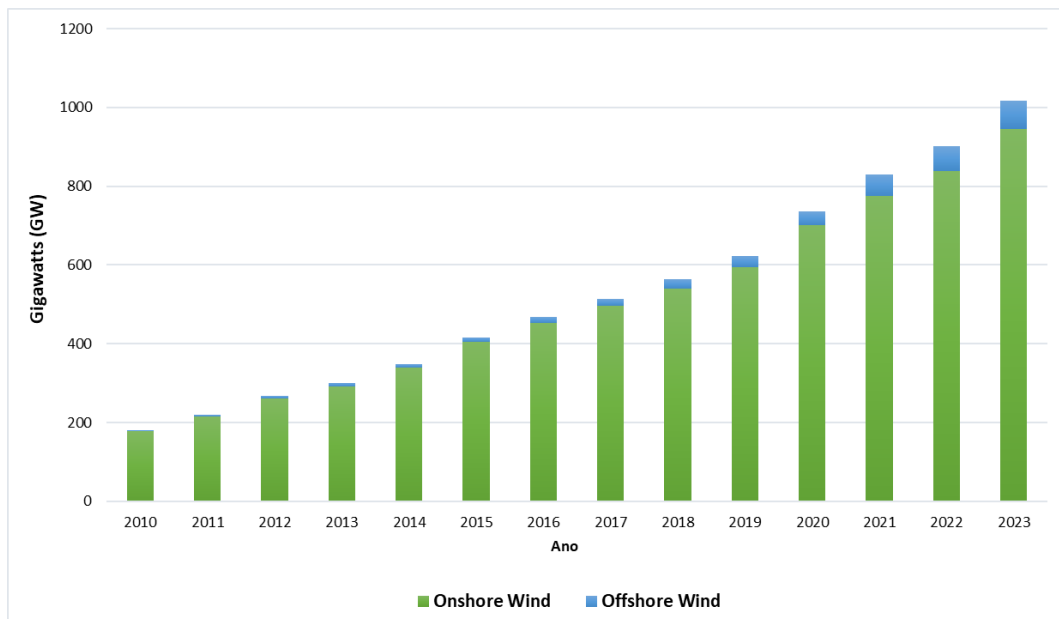


Figura 7- Capacidade cumulativa de energia eólica onshore e offshore a nível mundial (Bojek, 2022), (IRENA, 2024)

Segundo (Nunes, 2020), nas próximas três décadas, a geração de energia elétrica offshore, impulsionada pela inovação tecnológica, deve-se consolidar como uma fonte de geração elétrica madura e de participação relevante na matriz energética global. Projeta-se que a capacidade instalada global offshore cresça de 24 GW em 2018 para 228 GW em 2030 e aproximadamente 1000 GW em 2050.

Os aerogeradores podem ser classificados quanto à sua configuração das turbinas, sendo eles de eixo vertical (*VAWT's-Vertical Axis Wind Turbines*) e de eixo horizontal (*HAWT's-Horizontal Axis Wind Turbines*). A figura 8 ilustra o tipo de turbina eólica mais difundida no mercado atualmente, são as *HAWT*, devido à maior eficiência energética quando comparada com as *VAWT's*.



Figura 8-Turbinas eólicas de eixo horizontal

Podemos observar na figura 9 que os principais componentes de um aerogerador com turbinas de eixo horizontal são: (i) torre, (ii) pás, (iii) cubo, (iv) eixo de transmissão, (v) nacele, (vi) caixa de engrenagem ou multiplicadora (quando existente) e (vii) gerador.

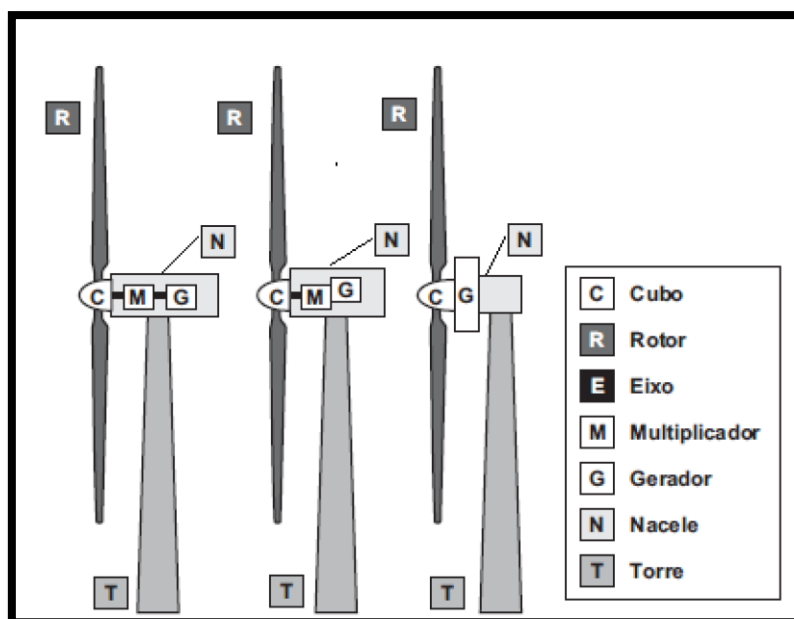


Figura 9-Principais componentes de um aerogerador de eixo horizontal (Nunes, 2020)

Em síntese, a tabela 1 expõe as principais vantagens e desvantagens enfrentadas com esse tipo de fonte energética.

Tabela 1-Vantagens e desvantagens das turbinas eólicas de eixo horizontal, construída pelo autor.

Vantagens		Desvantagens	
Alta Eficiência	São mais eficientes do que os VAWT, uma vez que são concebidos para capturar o vento de uma direção e podem otimizar o ângulo de ataque das pás para maximizar a geração de energia. Isto permite aos HAWT gerar mais eletricidade a partir da mesma quantidade de vento em comparação com os VAWT, resultando numa maior eficiência global.	Utilização de Materiais	Para fabricação das turbinas eólicas, requer uma grande quantidade de materiais. Esses materiais, por vezes de difícil acesso, extração e refino, pode gerar uma discrepância no setor ambiental, social, económico e político. Os principais materiais utilizados no fabrico de turbinas eólicas incluem: aço, materiais compósitos, cobre, alumínio, betão, resinas, e alguns elementos terras raras.
		Necessidade de espaço	As turbinas eólicas horizontais requerem tipicamente uma maior área terrestre em comparação com outras formas de geração de energia renovável, tais como os painéis solares. Necessitam de amplo espaço para que as pás capturem a energia eólica de forma eficaz. Isto pode ser um desafio em áreas urbanas ou densamente povoadas.
Escalabilidade	Os HAWT são altamente escaláveis e podem ser construídos em vários tamanhos, desde pequenas turbinas para uso residencial ou comercial até turbinas de grande escala para produção de energia em massa. Esta escalabilidade torna os HAWT adequados para uma vasta gama de aplicações, desde a alimentação de casas individuais ao fornecimento de eletricidade a comunidades inteiras ou mesmo à alimentação da rede.	Impacto visual e sonoro	-Poluição visual: principalmente para os moradores da região, uma vez que a instalação dos parques eólicos gera uma grande modificação na paisagem. - Poluição sonora: Quando o vento bate nas pás eólicas fazendo as mesmas se movimentarem, é produzido um ruído constante, gerando poluição sonora aos

			residentes naquela região.
Tecnologia estabelecida	Os HAWT são uma tecnologia bem estabelecida no mercado e amplamente utilizada para distribuição de energia.	Dependência da direção do vento	As turbinas eólicas horizontais são sensíveis à direção do vento e requerem que o vento sopre diretamente para dentro da turbina para gerar eletricidade de forma eficiente. São menos eficazes em áreas com padrões de vento inconsistentes ou variáveis. Se o vento for demasiado fraco ou demasiado forte, pode também afetar o desempenho das turbinas eólicas horizontais, levando potencialmente a uma diminuição da produção de energia.
Alturas de Hub mais elevadas	Os HAWT podem ser instalados em alturas de cubo (<i>Hub Height</i>) ² mais elevadas em comparação com os VAWT, permitindo-lhes captar recursos eólicos mais fortes e consistentes. Isto é especialmente vantajoso em áreas com baixas velocidades de vento perto do solo, uma vez que os HAWT podem ser instalados em alturas mais elevadas para aceder a ventos mais fortes e gerar mais electricidade.	Desafios de manutenção	As turbinas eólicas horizontais requerem manutenção regular, incluindo inspeção e reparação de componentes mecânicos, tais como engrenagens e rolamentos, bem como limpeza regular das pás para remover sujidade e detritos. O acesso e manutenção destes componentes pode ser um desafio e requerer equipamentos e equipas especializados, o que pode contribuir para os custos operacionais elevados.
Amplio apoio à indústria	Devido esse tipo de turbina ser bem estabelecida no mercado, os HAWT têm uma ampla base de fabricantes, desenvolvedores, e operadores, o que se traduz numa cadeia de fornecimento e indústria de serviços madura e robusta. Isto facilita a obtenção de componentes, instalação e	Impacto na vida selvagem	As turbinas eólicas horizontais podem representar um risco para animais e sobretudo as aves. Sem contar no desmatamento da vegetação e a perturbação do solo necessário para os parques eólicos.

² A altura do cubo (*Hub Height*) de uma turbina eólica é a distância do solo até o meio do rotor da turbina eólica. Ao longo dos anos *hub height* tem vindo a aumentar, de forma que as mesmas adquiram maior eficiência e maior aproveitamento do vento.

	manutenção dos HAWT, e beneficia da experiência e conhecimento da indústria de energia eólica existente.		
		Custo de capital	O custo de capital inicial da instalação de turbinas eólicas horizontais pode ser relativamente elevado, incluindo o custo do projeto, fabrico, ligação à rede, manutenção, entre outros... Portanto, as turbinas eólicas requerem um investimento inicial significativo, o que pode constituir uma barreira financeira para alguns projetos ou indivíduos.
		Reciclagem	As pás das turbinas são normalmente fabricadas em materiais compósitos, pelo que dificulta imenso o processo de reciclagem das mesmas.

Como referido anteriormente, os elementos terras raras são os principais minerais utilizados para a fabricação de ímãs permanentes, em geradores de turbinas eólicas. Embora existam diferentes tipos de ímãs permanentes, os ímãs de Neodímio-Ferro-Boro (NdFeB) são os mais usados devido às suas excelentes propriedades. A quantidade desses minerais requeridos para um gerador eólico depende não só do tamanho da turbina, mas também do tipo de turbina. Existem quatro tipos:

- *GB-DFIG*; gerador de indução de dupla alimentação com caixa de velocidades (*Gearbox double-fed induction generator*)
- *GB-PMSG*; gerador síncrono de ímãs permanentes com caixa de velocidades (*Gearbox permanent-magnet synchronous generator*)
- *DD-PMSG*; gerador síncrono de ímãs permanentes de acionamento direto (*Direct-drive permanent-magnet synchronous generator*)

- *DD-EESG*; gerador síncrono de acionamento direto excitado eletricamente
 (*Direct-drive electrically excited synchronous generator*)

Na tabela 2 são apresentados os materiais mais utilizados nos diferentes tipos de turbinas apresentados acima.

Tabela 2-Estimativa da utilização de materiais em tonelada por GW para diferentes tipos de turbinas eólicas (Carraca et al, 2020)

Material	Intervalo	DD-EESG	DD-PMSG	GB-PMSG	GB-DFIG
Betão	243 500 - 413 000	369 000	243 000	413 000	355 000
Aço	107 000 - 132 000	132 000	119 500	107 000	113 000
Polímeros	4 600	4 600	4 600	4 600	4 600
Vidro/ Compósitos de carbono	7 700 - 8 400	8 100	8 100	8 400	7 700
Alumínio (Al)	500 – 1 600	700	500	1 600	1 400
Boro (B)	0 - 6	0	6	1	0
Crômio (Cr)	470 - 580	525	525	580	470
Cobre (Cu)	950 - 5 000	5 000	3 000	950	1 400
Disprósio (Dy)	2 - 17	6	17	6	2
Ferro fundido (Fe)	18 000 – 20 800	20 100	20 100	20 800	18 000
Manganês (Mn)	780 - 800	790	790	800	780
Molibdênio (Mo)	99 - 119	109	109	119	99
Neodímio (Nd)	12 - 180	28	180	51	12
Níquel (Ni)	240 - 440	340	240	440	430
Praseodímio (Pr)	0 - 35	9	35	4	0
Térbio (Tb)	0 - 7	1	7	1	0
Zinco (Zn)	5 500	5 500	5 500	5 500	5 500

O mercado eólico onshore é atualmente dominado por GB-DFIGs, representando mais de 70% do mercado global (IEA, 2021). Os DD-PMSG duplicaram a sua quota de mercado nos últimos 10 anos, passando de cerca de 10% em 2010 para 20% em 2020. No setor offshore, as turbinas DD-PMSG são a principal escolha, com cerca de 60% do mercado mundial (IEA, 2021).

Devido a configuração das turbinas eólicas offshore DD-PMSG, as mesmas requerem maiores quantidades de terras raras e cobre quando comparado as com as turbinas GB-DFIGs. Devido à necessidade de conectar as turbinas à rede elétrica através de cabos

submersos longos, o uso de cobre pode ser até o dobro em comparação com instalações terrestres. Assim, embora turbinas eólicas offshore ofereçam vantagens como ventos mais fortes e constantes, o uso intensivo de materiais como terras raras e cobre destaca a necessidade de desenvolver tecnologias mais eficientes e sustentáveis para enfrentar os desafios do futuro energético global.

O tamanho mais comum de uma turbina eólica instalada atualmente varia dependendo do local e do tipo de instalação (onshore ou offshore). No entanto, para turbinas eólicas onshore, que são as mais frequentemente instaladas, a tendência recente tem sido a utilização de turbinas com capacidades entre 2 e 3,5 megawatts (MW) (Hartman et. al., 2022). Para turbinas offshore, as capacidades são geralmente maiores, com muitos dos modelos mais recentes variando entre 6 e 10 MW ou mais. Além disso, há desenvolvimentos em andamento para turbinas ainda maiores, com capacidades que podem chegar a 15 MW ou até mais (Pisanó, 2019).

Em relação aos materiais citados na tabela 2, é possível observar na figura 10 onde são utilizados e localizados cada material na estrutura da turbina eólica. Apesar da figura especificar os diferentes tipos de materiais que são empregues nos aerogeradores, é de se notar que a mesma não menciona que as pás das turbinas eólicas são normalmente fabricadas de materiais compósitos. Estes materiais podem incluir fibra de vidro, fibra de carbono ou uma combinação de ambos. Os materiais específicos utilizados podem variar consoante a dimensão da turbina eólica e as condições ambientais a que estará sujeita.

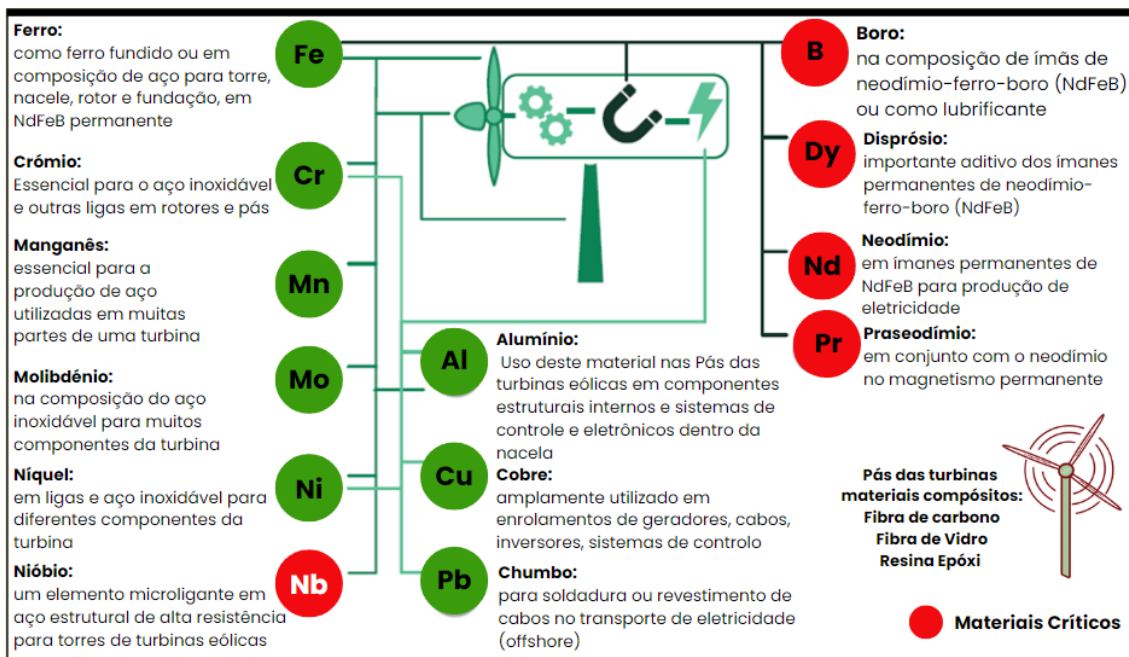


Figura 10-Materiais utilizados em turbinas eólicas (Carraca et. al., 2020)

Os materiais utilizados na fabricação dos aerogeradores podem sofrer mudanças significativas ao longo dos anos, dependendo do cenário de procura (baixa, média ou alta). Abaixo estão algumas considerações sobre como esses cenários podem influenciar na transição energética:

❖ O cenário de baixa procura (LDS):

O cenário de baixa procura pressupõe um aumento máximo da temperatura de 2°C em relação aos níveis pré-industriais, conforme o compromisso assumido no âmbito do Acordo de Paris. A UE considera metas juridicamente vinculativas para 2030 e visa alcançar uma redução de 64 % das emissões de GEE até 2050. Também pressupõe que a investigação e inovação conduzirão a um aumento significativo da vida útil das turbinas eólicas e dos veículos elétricos, bem como redução do uso dos diferentes materiais, e que os geradores que não dependem de ímãs permanentes terão uma fatia importante do mercado, limitando assim a procura por ímãs e materiais críticos (Carrara et. al., 2020).

❖ O cenário de média procura (MDS):

O cenário de média procura consiste em limitar o aumento da temperatura média global em 1,75°C acima dos níveis pré-industriais. Neste cenário, o setor energético atinge a neutralidade carbónica até 2060 para limitar os futuros aumentos de temperatura a 1,75°C até 2100 (Tsiropoulos et al, 2020).

❖ O cenário de alta procura (HDS):

O cenário de alta procura considera ambições políticas mais fortes, que conduzem a um aumento máximo da temperatura de 1,5 °C, a 100 % de energias primárias renováveis até 2050 e à descarbonização total da UE até 2050 (Carrara, 2020). Neste cenário haverá uma procura significativa de determinados materiais críticos e recursos devido à mudança global para fontes de energias renováveis (Carrara et. al., 2020).

Podemos observar na tabela 3 que a intensidade dos materiais nas turbinas eólicas entre os dois extremos de baixa e alta procura poderão sofrer algumas modificações a longo prazo (Carrara et. al., 2020).

Baseado nas estimativas de (Carrara et. al., 2020), a autora realizou o cálculo demonstrado nas tabelas 4 e 5, em relação as quantidades mínimas e máximas de terras raras utilizados na fabricação de ímãs permanentes (disprósio, térbio, neodímio e praseodímio) e respetiva redução dos mesmos de acordo com os cenários.

Tabela 3- Estimativa da procura futura de neodímio, praseodímio, disprósio e térbio (Dias et al, 2020)

Cenário de baixa procura	
Vida útil	30 anos para as turbinas eólicas em terra 35 anos para turbinas eólicas em mar
Intensidades dos materiais	Turbinas eólicas: 6 - 17 t/GW para o disprósio, com uma redução anual de 12 % até 2050 1 - 7 t/GW para o térbio, com uma redução anual de 5 % até 2050 51 - 180 t/GW para o neodímio, com uma redução anual de 5 % até 2050 4 - 35 t/GW para o praseodímio com uma redução anual de 5 % até 2050
Quotas de mercado dos geradores de ímanes permanentes	UE: De 30 % (2018) a 41 % (2030) a 52 % (2050) para turbinas em terra De 100 % (2018) a 48 % (2030) a 44 % (2050) para turbinas em mar Global: De 32 % (2018) a 32 % (2030) a 40 % (2050) para turbinas em terra De 76 % (2018) a 44 % (2030) a 41 % (2050) para turbinas offshore
Taxa de crescimento anual em outros setores	3 % para o neodímio, o praseodímio e o disprósio 6 % de redução do térbio na UE; 4,5 % de redução do térbio a nível mundial
Cenário de alta procura	
Vida útil	20 anos para as turbinas eólicas em terra 25 anos para as turbinas eólicas em mar Aumento linear de 9 para 11 anos entre 2015 e 2050 para os veículos elétricos
	Turbinas eólicas: 6 - 17 t/GW para o disprósio com uma redução anual de 2 % até 2050

Materiais críticos para a transição energética: análise global e implicações ambientais
Mestrado de Engenharia de Materiais

Intensidade de materiais	1 - 7 t/GW para o térbio, sem redução ao longo do tempo 51 - 180 t/GW para o neodímio, sem redução ao longo do tempo 4 - 35 t/GW para o praseodímio sem redução ao longo do tempo
Quotas de mercado para geradores de ímãs permanentes em turbinas eólicas	UE: De 30 % (2018) a 52 % (2030) a 65 % (2050) para turbinas em terra De 100 % (2018) a 95 % (2030) a 95 % (2050) para turbinas em mar Global: De 32% (2018) a 46% (2030) a 68% (2050) para turbinas em terra
Taxa de crescimento anual nos outros setores	10 % para o neodímio, o praseodímio e o disprósio Nenhuma alteração para o térbio na UE; redução de 1,5 % para o térbio a nível global

Tabela 4-Cenário de baixa procura para os materiais: neodímio, praseodímio, disprósio e térbio e perspectivas futuras.
Construído pelo autor, com base nos dados de (Carrara et. al., 2020).

	2018	2018	-	-	2019	2020	2021	2022	2030	2040	2050
Cenário de baixa procura	Min Materiais (t/GW)	Máx Materiais (t/GW)	Proporção dos materiais	Redução (Red.) Anual	Máx (Red. Acordo) (%)	Máx (Red. Acordo) (%)	Máx (Red. Acordo) (%)	Máx (Red. Acordo) (%)	Máx (Red. Acordo) (%)	Máx (Red. Acordo) (%)	Máx (Red. Acordo) (%)
Disprósio	6	17	7%	12%	14,96	13,16	11,60	10,19	3,67	1,02	0,28
Térbio	1	7	3%	5%	6,65	6,32	6,00	5,70	3,78	2,26	1,36
Neodímio	51	180	75%	5%	171,00	162,45	154,33	146,61	97,26	58,24	34,87
Praseodímio	4	35	15%	5%	33,25	31,59	30,01	28,51	18,91	11,32	6,78
Total	62	239	100%	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 5-Cenário de alta procura para os materiais: neodímio, praseodímio, disprósio e térbio e perspectivas futuras.
Construído pelo autor, com base nos dados de (Carrara et. al., 2020).

	2018	2018	-	-	2019	2020	2021	2022	2030	2040	2050
Cenário de alta procura	Min Materiais (t/GW)	Máx Materiais (t/GW)	Proporção dos materiais	Redução (Red.) Anual	Máx (Red. Acordo)	Máx (Red. Acordo)	Máx (Red. Acordo)	Máx (Red. Acordo)	Máx (Red. Acordo)	Máx (Red. Acordo)	Máx (Red. Acordo)
Disprósio	6	17	7%	2%	16,66	16,33	16,00	15,68	13,34	10,90	8,91
Térbio	1	7	3%	0%	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
Neodímio	51	180	75%	0%	180,00	180,00	180,00	180,00	180,00	180,00	180,00
Praseodímio	4	35	15%	0%	35	35	35	35	35	35	35
-	62	239	100%	-	-	-	-	-	-	-	-

Como podemos analisar na tabela 5, o cenário de alta procura será impulsionado pelo uso intensivo de terras raras, sem redução significativa dos mesmos ao longo dos anos. Esse fato dar-se-á pelo fato da obsessão em reduzir o aumento da temperatura em 1,5 °C e respetiva neutralidade carbónica até 2050. Vale ressaltar, que esses cálculos são puras extrapolações, e que esses números podem ser modificados conforme muitos fatores, como avanços tecnológicos, políticas governamentais, mudanças económicas e disponibilidade dos materiais para as tecnologias emergentes.

2.2 Energia Solar

É importante destacar que a avaliação dos recursos alternativos para atender à crescente procura de eletricidade é um aspeto essencial e fundamental no planeamento e desenvolvimento dos países em crescimento. Entre os diversos recursos disponíveis no mercado para produção de energia, podemos considerar a energia solar fotovoltaica como uma relevante³ fonte energética. A capacidade global dessa fonte de energia tem crescido continuamente ao longo dos anos.

De acordo com a (Statista, 2023), a capacidade solar fotovoltaica instalada acumulada a nível mundial atingiu cerca de 1.177 GW no final de 2022, o que representa um aumento significativo em relação aos apenas 1,3 GW registados em 2000 (figura 11).

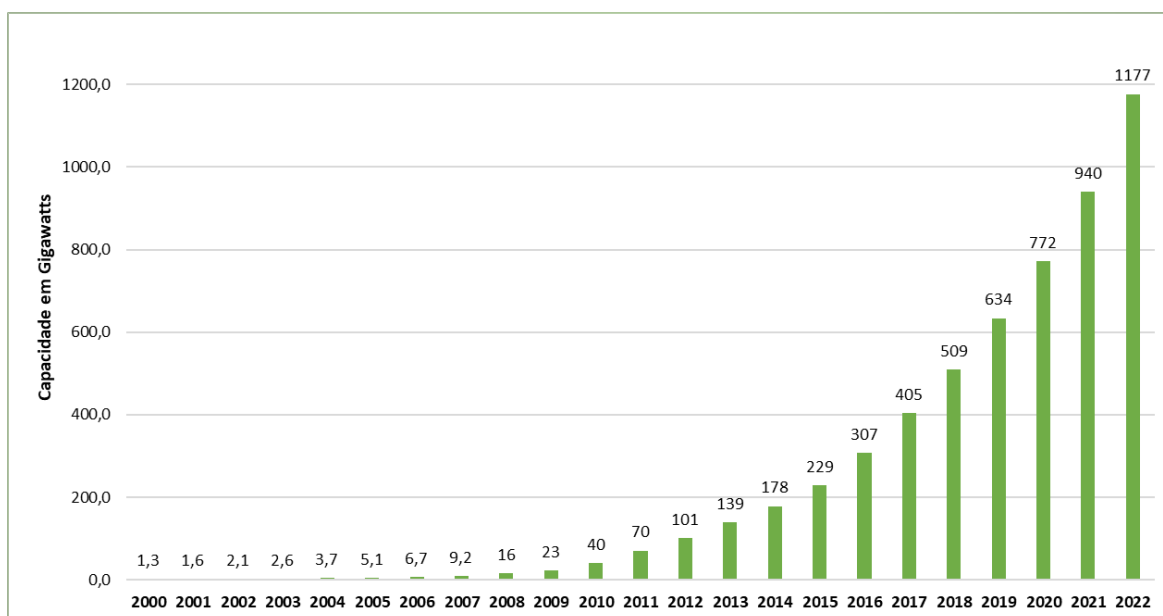


Figura 11-Capacidade cumulada de energia solar fotovoltaica instalada globalmente entre 2000 e 2022, (Statista, 2023)

Como funcionalidade, os painéis fotovoltaicos atuam pela conversão direta da energia solar, em eletricidade a um nível atómico. Alguns materiais exibem uma propriedade conhecida como o efeito fotoelétrico que os faz absorver fótons de luz e libertar eletrões. Quando estes eletrões livres são capturados, resulta na criação de corrente elétrica.

No que se refere às tecnologias fotovoltaicas comerciais, podemos referir o Silício Cristalino (c-Si) (silício monocristalino ou policristalino) e a filme fino (*Thin-film*) utilizando Silício amorfo (*a-Si*), *Copper Indium Gallium Selenide (CIGS)* ou *Cadmium*

³ Quando me refiro relevante, é pelo fato de ser uma das tecnologias que também precisa ser analisada com real atenção, quanto à dependência por certos minerais, e outros fatores interligados para a obtenção desta energia.

Telluride (CdTe). Os painéis solares de silício cristalino são a tecnologia dominante no mercado, representando cerca de 95% da capacidade fotovoltaica instalada em todo o mundo (Comissão Europeia, 2020). O CdTe e o CIGS podem ser depositados em substratos flexíveis, o que os torna adequados para aplicações fotovoltaicas integradas em edifícios ou outras aplicações não convencionais. As células de silício amorfo são maioritariamente utilizadas em aplicações de pequena escala e de baixa potência; cada uma destas tecnologias tem suas próprias vantagens e desvantagens, sendo as mesmas empregues de acordo com a necessidade do consumidor. Na tabela 6 são representados as principais vantagens, desvantagem, custo, eficiência e durabilidade de cada tipo de painel solar.

Tabela 6-Principais características dos painéis solares, contruída pelo autor

Tipo de painel	Vantagens	Desvantagens	Eficiência	Custo de produção	Durabilidade
Silício Monocristalino	Alta eficiência, ocupam menos espaço, bom desempenho com pouca luz Durabilidade	Custo elevado de produção, temperaturas extremamente altas podem afetar seu desempenho	17-22%	Alto	25-38 anos
Silício Policristalino	Eficiência de produção, durabilidade, bom desempenho a temperaturas elevadas	Baixa eficiência em relação ao monocristalino, área de instalação maior, menos eficiente em condições de pouca luz	13-16%	Médio	25-30 anos
Filme fino (Thin-film)	Flexível, leve, Custos de instalação mais baixos,	Menor eficiência, vida útil menor, maior área necessária, mais caro por watt	7-18%		10-20 anos
Copper Indium Gallium Selenide (CIGS)	Flexíveis, leves, filme fino, menos toxicidade do que os módulos fotovoltaicos de CdTe	Mais caros, maior área necessária, menos eficiente	22 – 25%	Médio/Alto	20-25 anos

Materiais críticos para a transição energética: análise global e implicações ambientais
Mestrado de Engenharia de Materiais

Cadmium Telluride (CdTe)	Filme fino, fácil fabricação, alta taxa de absorção da luz	Baixa eficiência, fornecimento do telúrio limitado, toxicidade do cádmio,	9 – 10%	Baixo	10 – 20 anos
Silício amorfo (a-Si)	Leve, flexível, funcionam facilmente com pouca luz, filme fino	Baixa desempenho, mais adequado para aplicações de pequena escala	6 – 10%	Baixo	10 – 15 anos

Na figura 12 podemos identificar os principais tipos de materiais utilizados na fabricação dos painéis fotovoltaicos. É importante destacar que o tipo de painel solar pode variar conforme o material empregado em sua produção.

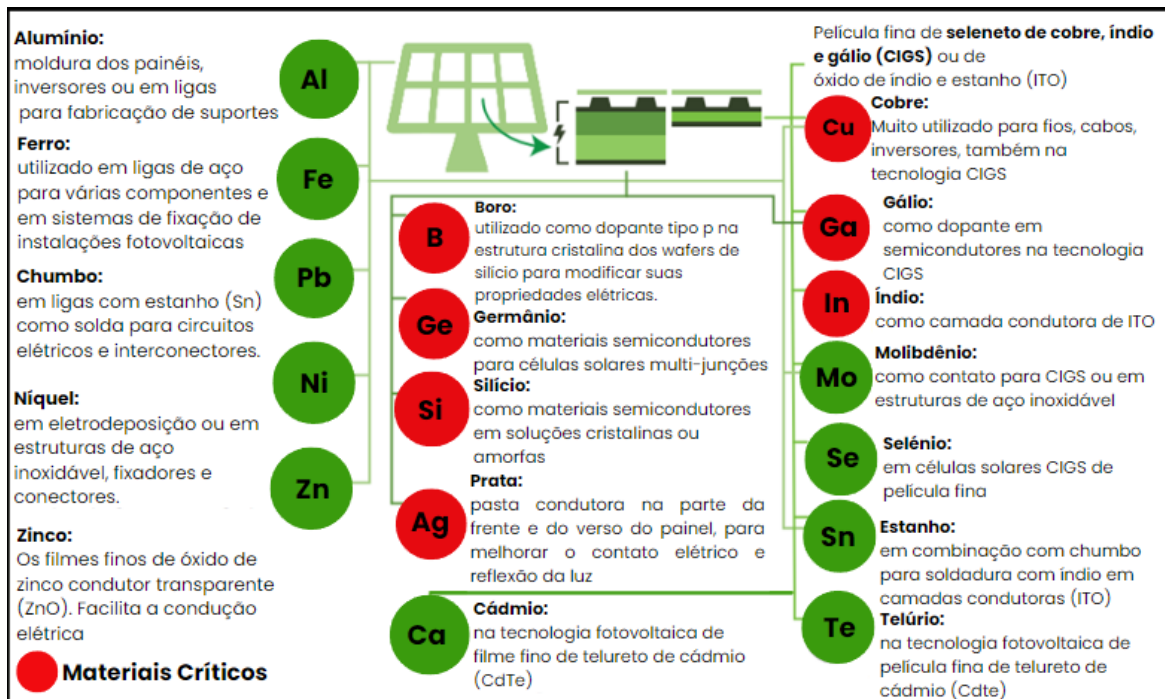


Figura 12-Materiais utilizados nas tecnologias solares fotovoltaicas (Comissão Europeia, 2020).

A tabela 7 destaca a intensidade dos materiais em diferentes cenários. Assim como no caso das turbinas eólicas, é possível observar uma alteração nos valores dos materiais de acordo com o tipo de cenário (LDS e HDS). Visto que no cenário de baixa procura pretende-se minimizar o uso intensivo dos materiais, podemos analisar que todos esses metais sofrem um declínio entre 2018 e 2050. No outro extremo está o cenário de alta

procura, neste caso não há uma redução significativa dos materiais, visto que o mesmo depende desses minerais para a acelerar da neutralidade carbónica.

Tabela 7- Estimativa da intensidade de materiais necessários para fabricação de painéis fotovoltaicos em diferentes cenários (Carrara et al, 2020)

Tecnologia	Mineral	Cenário	Unidade	2018	2030	2050
Todas ⁴	Betão	LDS ⁵	t/MW	60.7	56.2	48.6
Todas	Betão	MDS ⁶	t/MW	60.7	58.4	54.6
Todas	Betão	HDS ⁷	t/MW	60.7	60.7	60.7
Todas	Aço	LDS	t/MW	67.9	62.8	53.3
Todas	Aço	MDS	t/MW	67.9	65.3	61.1
Todas	Aço	HDS	t/MW	67.9	67.9	67.9
Todas	Plástico	LDS	t/MW	8.6	7.9	6.9
Todas	Plástico	MDS	t/MW	8.6	8.3	7.7
Todas	Plástico	HDS	t/MW	8.6	8.6	8.6
Todas	Al	LDS	t/MW	7.5	6.9	6.0
Todas	Al	MDS	t/MW	7.5	7.2	6.8
Todas	Al	HDS	t/MW	7.5	7.5	7.5
Todas	Cu	LDS	t/MW	4.6	4.3	3.7
Todas	Cu	MDS	t/MW	4.6	4.5	4.2
Todas	Cu	HDS	t/MW	4.6	4.6	4.6
c-Si	Si	LDS	t/MW	4.0	2.0	1.0
c-Si	Si	MDS	t/MW	4.0	2.75	2.0
c-Si	Si	HDS	t/MW	4.0	3.5	3.0
c-Si	Ag	LDS	t/GW	20.0	4.0	1.0
c-Si	Ag	MDS	t/GW	20.0	6.0	2.0
c-Si	Ag	HDS	t/GW	20.0	11.0	5.0

⁴ A nomenclatura “todas” foi dada para identificar que todos os painéis solares utilizam betão, aço, plástico, alumínio e cobre. Seja no momento da instalação dos painéis, ou para fabricação do mesmo.

⁵ Cenário baixa procura.

⁶ Cenário média procura.

⁷ Cenário alta procura.

Materiais críticos para a transição energética: análise global e implicações ambientais
Mestrado de Engenharia de Materiais

CdTe	Cd	LDS	t/GW	35.0	20.0	10.0
CdTe	Cd	MDS	t/GW	50.0	27.0	12.0
CdTe	Cd	HDS	t/GW	85.0	60.0	35.0
CdTe	Te	LDS	t/GW	35.0	20.0	11.0
CdTe	Te	MDS	t/GW	52.0	27.0	15.0
CdTe	Te	HDS	t/GW	95.0	70.0	40.0
CIGS	Cu	LDS	t/GW	20.0	12.5	6.0
CIGS	Cu	MDS	t/GW	22.0	15.0	10.5
CIGS	Cu	HDS	t/GW	24.0	17.5	15.0
CIGS	In	LDS	t/GW	10.0	8.0	5.0
CIGS	In	MDS	t/GW	15.0	10.0	6.0
CIGS	In	HDS	t/GW	27.0	17.0	10.0
CIGS	Ga	LDS	t/GW	3.0	2.0	1.0
CIGS	Ga	MDS	t/GW	4.0	2.5	1.5
CIGS	Ga	HDS	t/GW	7.0	4.5	2.5
CIGS	Se	LDS	t/GW	22.0	17.0	9.0
CIGS	Se	MDS	t/GW	35.0	20.0	12.0
CIGS	Se	HDS	t/GW	60.0	40.0	20.0
a-Si	Si	LDS	t/GW	150.0	75.0	40.0
a-Si	Si	MDS	t/GW	150.0	100.0	75.0
a-Si	Si	HDS	t/GW	150.0	130.0	110.0
a-Si	Ge	LDS	t/GW	48.0	22.0	10.0
a-Si	Ge	MDS	t/GW	48.0	27.0	15.0
a-Si	Ge	HDS	t/GW	48.0	32.0	20.0

Uma visão geral das matérias-primas comumente mais utilizadas nas tecnologias fotovoltaicas e da sua funcionalidade é apresentada na figura 12.

Milhões de painéis solares foram instalados nas últimas duas décadas – e como normalmente duram entre 25 e 30 anos, muitos estarão em breve prontos para serem retirados de uso e provavelmente irão para aterros sanitários⁸. No entanto, novos esforços para reciclar estes painéis poderão reduzir tanto a quantidade de resíduos, como a extração de novos materiais. Cerca de 8 milhões de toneladas métricas de painéis solares desativados poderão acumular-se globalmente até 2030. Em 2050, esse número poderá atingir 80 milhões (Crownhart, 2021).

Tornar a reciclagem de painéis solares mais comum exigirá uma combinação de avanços tecnológicos, incentivos económicos e políticas a nível global. Atualmente o custo de desmontar um painel solar e recuperar os materiais pode ser maior do que o valor das próprias matérias-primas em alguns casos (Socio, 2022). Como visto no decorrer deste tópico, os painéis solares contêm uma variedade de materiais, e cada material requer um processo de reciclagem específico, o que torna o processo complexo e por consequência dispendiosa.

2.3 Baterias

Face a tais exigências globais para redução das emissões que os veículos elétricos (EVs) vêm ganhando cada vez mais espaço como alternativa para uma mobilidade “sustentável”, em oposição aos veículos com Motor a Combustão Interna (MCI) dependentes de combustíveis fósseis (Rodrigues et Al. 2020). As circunstâncias referidas e pressões de todas as partes para uma acelerada neutralidade carbônica, os EVs obtiveram um espantoso crescimento a nível global, como veremos mais a frente.

Em termos de baterias, as mais amplamente utilizadas em EVs são as de íões de lítio, sobretudo na eletromobilidade, obtendo uma melhor aceitação de mercado. Estas baterias utilizam células de íões de lítio para armazenar e libertar energia. São leves (em comparação com as baterias chumbo-ácido e níquel-cádmio), apresentam maior densidade energética, maior nível de potência e podem ser recarregadas rapidamente (Rodrigues et al, 2020).

⁸ Atualmente, cerca de 90% dos painéis solares em fim de vida ou defeituosos também acabam em aterros, em grande parte porque custa muito menos despejá-los do que reciclá-los (Woods, 2023).

Entre as baterias de íons de lítio é possível identificar diversas categorias e aplicações, pois os ânodos⁹ e cátodos¹⁰ podem conter diversos materiais e composições químicas (Rodrigues et al, 2020). Os materiais específicos podem variar consoante o tipo de química¹¹ da bateria utilizado pelo fabricante. Cada uma das combinações possíveis está associada a diferentes vantagens e desvantagens em termos de disponibilidade de material, desempenho, custo, segurança, durabilidade, temperatura de operação, ciclo de vida, segurança, entre outros requisitos.

As baterias são categorizadas pela química do cátodo utilizado. No caso dos ânodos, o material mais utilizado é a grafite. Portanto, os principais tipos de cátodos utilizados nas baterias de íons de lítio são:

- Óxido de lítio-cobalto (LCO)
- Óxido de lítio-manganês (LMO)
- Óxido de Lítio-Ferro-Fosfato (LFP)
- Óxido de lítio-alumínio níquel-cobalto (NCA e NCA+)
- Óxido de lítio-níquel-manganês-cobalto (NMC 111, NMC 333, NMC 532, NMC 622, NMC 811)

Na figura 13 temos uma comparação entre os diferentes tipos de baterias usadas em veículos elétricos, tendo em conta o uso de minerais em quilogramas por veículo. É de verificar que os veículos de combustão interna (ICE) quase não se utilizam esses tipos de minerais.

⁹ O ânodo é o eletrodo negativo da célula de íons-lítio, que geralmente é feito de grafite ou algum outro material que possa intercalar íons de lítio durante o processo de carga da bateria (Keheng, 2023).

¹⁰ O cátodo é o eletrodo positivo da célula de íons-lítio. A produção do eletrodo é de óxidos de metal, como óxido de cobalto, óxido de níquel, óxido de manganês, ou uma mistura desses materiais (Keheng, 2023).

¹¹ Há no mercado diversos tipos de químicas que alimentam as baterias tais como NiMH (Níquel-hidreto metálico), Zebra (Zeolite Battery Research Africa Project) e versões avançadas das tradicionais baterias PbA de chumbo-ácido como PbA-EFB (Enhanced Flooded Battery) e PbA-VRLA (Valve Regulated Lead Acid Batteries). Entre os diversos tipos, as baterias de íons de lítio as que tem obtido melhor aceitação no mercado atual.

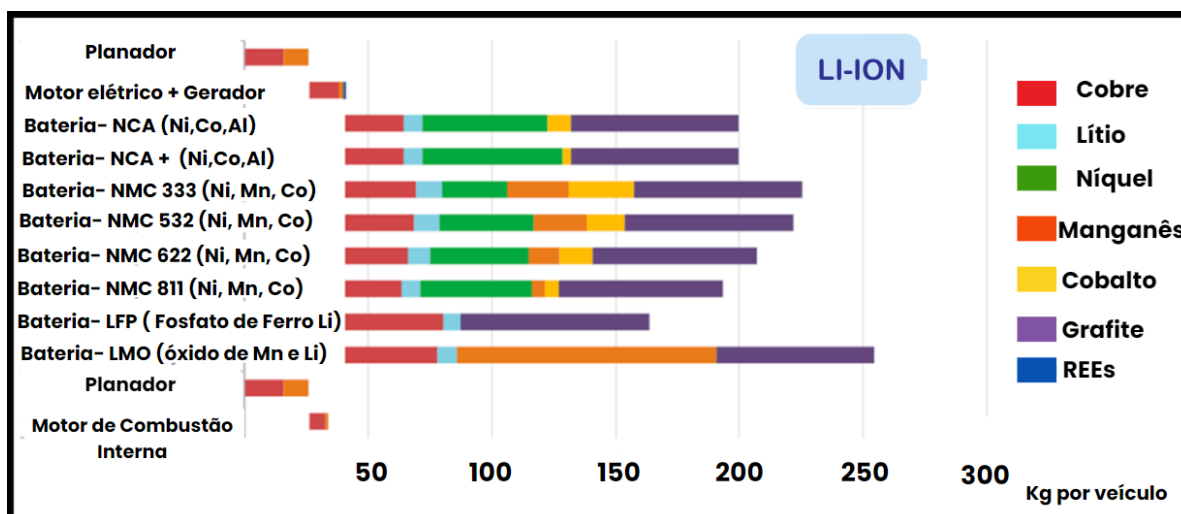


Figura 13-Comparação do uso de minerais entre veículos a combustão e veículos elétricos (IEA, 2022)

Como visto na figura 13, as baterias de EVs consomem uma imensa quantidade de materiais para sua manufatura. Esse cenário conduz a uma das perguntas que inicialmente foi feita no tópico 2.1, pela qual podemos questionar se a transição energética é realmente sustentável e limpa? Estamos realmente caminhando na direção correta?

Uma análise recentemente feita por (Paulikas et al. 2020) destaca que cerca de 70%-80% das emissões de gases de efeito de estufa provém da produção de matérias-primas que entram nas baterias de íões de lítio. A tabela 8 apresenta a quantidade em quilogramas dos metais utilizados no cátodo, por kWh de capacidade da bateria, para as principais baterias fabricadas atualmente. Por exemplo, uma bateria NMC-111 de 75 kWh conterà aproximadamente 10,43 kg de lítio, 29,40 kg de níquel, 29,55 kg de cobalto, 27,50 kg de manganês e outras dezenas de quilogramas de grafite, alumínio e cobre (Paulikas et al. 2020).

Tabela 8-Quantidade de materiais contidos nas baterias de íões de lítio de acordo com (Paulikas et al. 2020)

Cathode Chemistry	Kilograms per kWh				Kilograms per 75 kWh Battery				Total/75 kWh
	Lithium	Cobalt	Nickel	Manganese	Lithium	Cobalt	Nickel	Manganese	
LCO	0.113	0.959			8.48	71.93			80.40
NCA	0.112	0.143	0.759		8.40	10.73	56.93		76.05
NMC-111	0.139	0.394	0.392	0.367	10.43	29.55	29.40	27.53	96.90
NMC-622	0.126	0.214	0.641	0.200	9.45	16.05	48.08	15.00	88.58
NMC-811	0.111	0.094	0.750	0.088	8.33	7.05	56.25	6.60	78.23

Para além da procura dos materiais para as baterias de lítio, o processo de fabricação pode ser extremamente poluente, a quantidade exata de CO₂ emitido ao longo do processo pode

variar muito dependendo de quais materiais são usados, tipo de bateria, local de produção técnica envolvida, tipos de fontes de energia utilizadas, entre outros fatores. Por exemplo, para a fabricação do Tesla Model 3 com uma bateria de íons de lítio de 80 kWh, são emitidos cerca de 2 a 16 toneladas de CO₂ (Mit, 2022). Isso sem contabilizar as emissões poluentes no processo de mineração, extração e refino de cada material envolvido nas baterias.

De forma sucinta, a figura 14 evidencia os principais materiais mais comumente utilizados (e previstas) nas baterias de veículos elétricos e as suas funcionalidades.

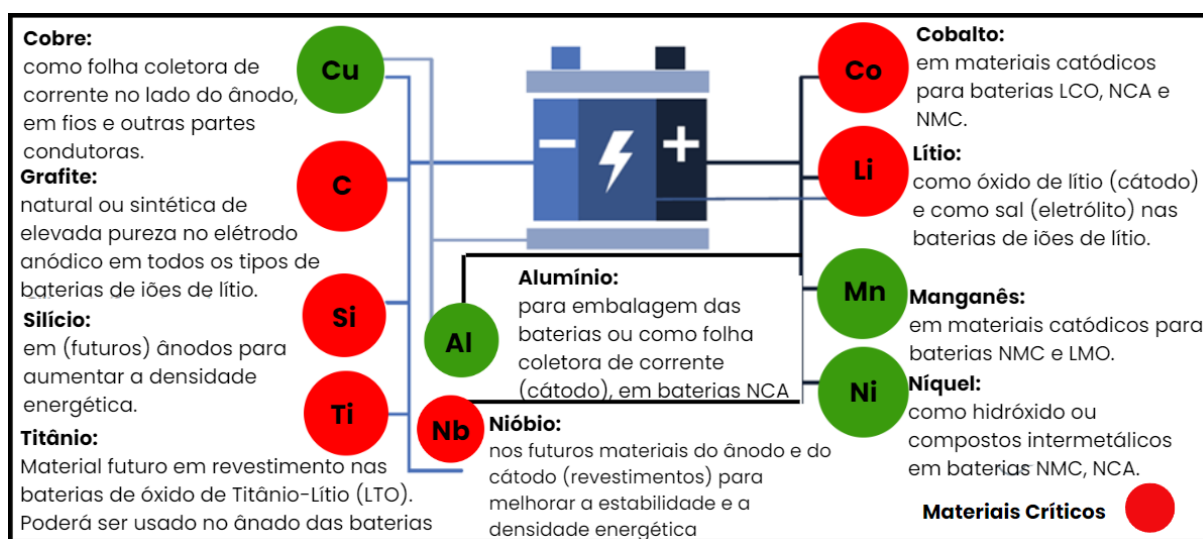


Figura 14-Materiais comumente utilizados nas baterias (Carrara et al. 2020)

De acordo com a (IEA, 2024), quase 14 milhões de novos carros elétricos foram registados globalmente em 2023 (figura 15), atingindo um número total de 40 milhões de EVs nas estradas. Embora as vendas destes veículos estejam a aumentar a nível mundial, os mesmos permanecem significativamente concentradas apenas em alguns mercados. Em 2023, cerca de 60% dos novos registos de EVs ocorreram na China, 25% na Europa e 10% nos Estados Unidos – correspondendo a quase 95% das vendas globais de carros elétricos. No entanto, as vendas permanecem limitadas em outros locais, mesmo em países com mercados automóveis desenvolvidos, como o Japão e a Índia.

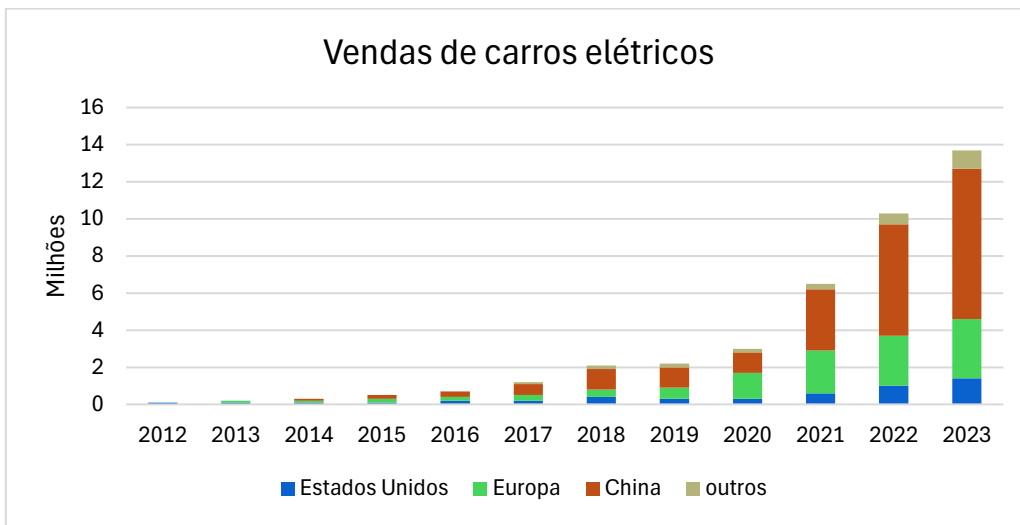


Figura 15-Evolução das vendas globais de automóveis elétricos nos últimos anos (IEA, 2024).

Espera-se que mais de um em cada cinco carros vendidos em todo o mundo este ano (IEA, 2024) seja elétrico, prevendo-se que o aumento da procura durante a próxima década irá refazer a indústria automotiva globalmente e reduzir significativamente o consumo de petróleo para o transporte rodoviário, de acordo com a (IEA, 2024). As vendas globais de automóveis elétricos em 2024 deverão permanecer altas, atingindo cerca de 17 milhões EVs até ao final do ano. No primeiro trimestre deste ano (IEA, 2024), as vendas cresceram cerca de 25% em comparação com o mesmo período de 2023.

Vale ressaltar, o fato da necessidade global de eletrificação dos meios de transportes não se limita apenas ao transporte rodoviário, mas também aos outros dois setores de transporte muito importantes, a aviação e o transporte marítimo, responsáveis atualmente por cerca de 3,0% cada uma das emissões globais de CO₂. As projeções para 2050 de alguns estudos (S&P Global Platts Analytics, 2022) indicam que as emissões destes setores podem atingir 17% a 20%. (Paulikas et. al., 2020) estimam que atualmente o transporte rodoviário é o que mais contribui para as emissões de carbono (72%), enquanto as aeronaves contribuem com uma quota de 11% e os navios aparecem com 9,5%.

Capítulo 3

O conceito de materiais críticos

Neste capítulo será discutido o que determina a criticidade de um material. De um modo geral, este conceito aplica-se ao conjunto de minerais e metais que requerem um esforço de extração significativo, cuja produção está concentrada num pequeno número de países, em que a quantidade dos recursos naturais está a diminuir, em que será necessário um aumento maciço da oferta e em que os preços têm apresentado grandes oscilações que refletem desequilíbrios entre a oferta e a procura (IRENA, 2021). A criticidade dos materiais é geralmente definida em termos de: risco de fornecimento, vulnerabilidade a restrições de fornecimento, e implicações ambientais, sociais e económicas (Sustainable Systems, 2023).

Certos materiais têm sido utilizados em quantidades crescentes durante décadas ou séculos, e o seu fornecimento crescente não enfrenta restrições. Por exemplo, o aço e o betão não são geralmente considerados materiais críticos apesar das recentes preocupações com a disponibilidade de areia e gravilha para o betão em algumas partes do mundo. Também o alumínio não é considerado um material crítico, apesar da necessidade de um aumento maciço da oferta: o recurso está disponível e amplamente distribuído, e constitui um metal facilmente reciclável.

Uma análise da literatura recente sugere que existe pouco consenso sobre quais os materiais críticos (IRENA, 2021). Mas alguns materiais estão incluídos na maioria dos estudos de avaliação, tais como:

- Cobalto
- Cobre
- Níquel
- Lítio
- Elementos Terras Raras, nomeadamente o neodímio, disprósio, praseodímio, entre outros.

Nem todos os materiais críticos são metais (por exemplo, a grafite). O termo "materiais críticos" refere-se à produção transformada; por vezes, é também utilizado o termo

"minerais", que se refere aos produtos extraídos. Para efeitos do presente documento, utilizaremos o termo "materiais críticos".

Para alguns dos materiais críticos, o campo de aplicações é limitado. Noutros casos, a aplicação é bastante generalizada. Por exemplo, a procura recente por lítio, cobalto e níquel está estreitamente relacionada com a produção em massa de baterias de íões de lítio. A procura de neodímio e disprósio está intimamente relacionada com a produção de ímanes permanentes em motores e geradores elétricos. No entanto, o cobre é utilizado nos três domínios de aplicação: na produção de energia renovável, nas redes elétricas e em aplicações elétricas de utilização final, como os veículos elétricos.

Entretanto, têm-se verificado preocupações crescentes relativamente à fiabilidade do fornecimento de alguns destes metais. Um dos principais fatores que contribuem para estas preocupações é o fato de muitos destes metais serem recuperados apenas como subprodutos de um número limitado de depósitos de minério geopoliticamente concentrados, tornando os seus fornecimentos incapazes de responder a mudanças rápidas na procura.

A complementaridade é o grau em que um metal é obtido, em grande parte ou na totalidade, como subproduto de um ou mais metais hospedeiros (*host metals*) a partir de minérios geológicos. A dependência da disponibilidade do metal companheiro¹² (*companionship*) da produção dos metais hospedeiros¹³ introduz uma nova faceta de risco de fornecimento para a tecnologia moderna. Em um estudo recentemente feito por (N.T.Nassar et al, 2015), os autores analisam 62 metais e metalóides diferentes e concluem que 61% (38 de 62) têm uma complementaridade superior a 50%. Dezoito dos 38 - incluindo elementos tecnologicamente essenciais como o germânio, o térbio e o disprósio - são ainda caracterizados como tendo uma produção geopoliticamente concentrada e taxas extremamente baixas de reciclagem em fim de vida. É neste subconjunto de metais complementares - vitais nas tecnologias atuais, como a eletrônica, energia solar, imagiologia médica, iluminação eficiente em termos energéticos e outros

¹² Companheiro ou subproduto tem o mesmo significado. Tem haver com esse material ser subproduto ou dependente da extração do mineral principal (hospedeiro).

¹³ O termo hospedeiro refere-se ao material principal extraído na mina.

produtos de ponta - que pode correr o maior risco de restrições de fornecimento nas próximas décadas.

Embora estes metais principais, juntamente com vários metais preciosos, ainda constituam a base de qualquer economia desenvolvida, é do conjunto de outros metais "menores" e metalóides da tabela periódica que a tecnologia moderna está cada vez mais dependente para desempenhar funções especializadas. Ao contrário dos metais maiores, estes metais menores são normalmente encontrados em concentrações relativamente baixas, inferiores a cerca de 0,1%, caso em que raramente formam depósitos viáveis por si próprios, ocorrendo antes intersticialmente nos minérios de metais com propriedades físicas e químicas semelhantes. Estes metais menores são assim frequentemente recuperados apenas como subprodutos durante o processamento dos metais maiores, o(s) seu(s) "hospedeiro(s)". A disponibilidade destes "subprodutos" ou metais "companheiros" depende, assim, não só da produção mineira do(s) seu(s) metal(ais) hospedeiro(s), mas também do fato de os metais companheiros serem recuperados em vez de serem eliminados sem terem sido processados. Isto suscita preocupações quanto à sua disponibilidade, dada a sua rápida utilização numa série de aplicações emergentes de energia eletrónica e solar (por exemplo, gálio e índio), como elementos de liga em aplicações de alta temperatura (por exemplo, cobalto) e em tecnologias como a energia eólica offshore (por exemplo, vários dos elementos de terras raras) (N.T.Nassar et al, 2024).

O grau de companheirismo varia muito entre os diferentes metais. No caso do índio, por exemplo, as concentrações típicas no minério hospedeiro de zinco são de apenas algumas partes por milhão, demasiado baixas para serem extraídas para o índio propriamente dito. Assim, quase toda a produção de índio ocorre como subproduto do zinco (com quantidades muito menores provenientes de minérios de estanho e cobre, também como subproduto) (Nassar et al, 2024). Em contrapartida, a prata tem, por vezes, depósitos suficientemente ricos para permitir a extração direta de prata. Mais frequentemente, no entanto, a prata é um constituinte menor nos minérios de metais hospedeiros, especialmente zinco, níquel, cobre e ouro, e é desses minérios que a maior parte da prata (cerca de 71% da produção global total) é derivada (Nassar et al, 2024). Na figura 16 é representado a roda do companheirismo metálico.

Os principais metais hospedeiros formam o círculo interior. Os elementos companheiros aparecem no círculo exterior a distâncias proporcionais à percentagem da sua produção primária (de 100 a 0%) que tem origem no metal hospedeiro indicado. Os elementos companheiros na região branca do círculo exterior são elementos para os quais a percentagem da sua produção que tem origem no metal hospedeiro indicado não foi determinada.

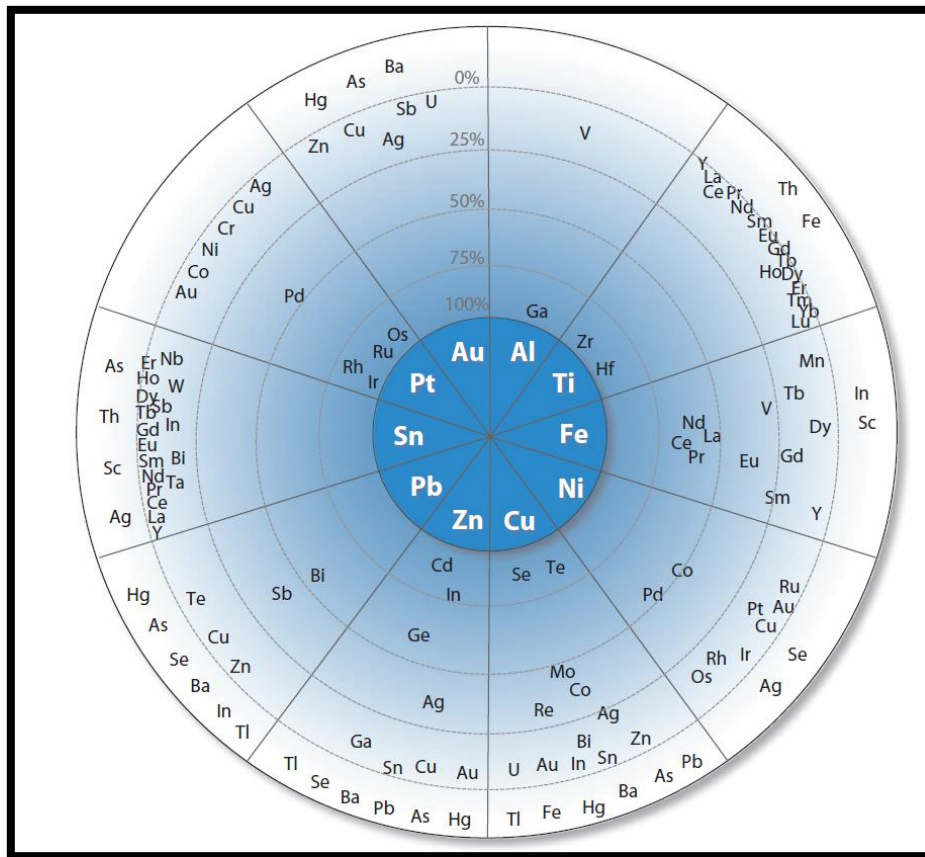


Figura 16-Círculo do companheirismo metálico (N.T.Nassar et al, 2024)

Quanto mais nos distanciarmos do centro da circunferência acima (material hospedeiro), mais complexa é a obtenção do metal companheiro a partir deste. Por exemplo, na extração do estanho como produto principal, pode-se retirar uma quantidade muito pequena do disprósio. E por vezes, essa quantidade de material tão pequena é desperdiçada ou não reaproveitada, pelo fato de não ser economicamente viável.

Capítulo 4

Análise sobre a procura dos materiais críticos

A alta procura por materiais críticos está profundamente enraizada nas mudanças económicas e tecnológicas globais. Nesse contexto, veremos mais a frente que a produção destes materiais tem se intensificado substancialmente, e essa tendência continuará até ser alcançado a neutralidade carbónica. Para satisfazer este consumo, será necessário uma taxa elevada de mineração e extração. Embora alguns destes materiais sejam abundantes na crosta terrestre, será inevitável a abertura de novas minas, pelo que não é tão fácil como parece, a média de anos entre a descoberta e a entrada em produção de uma mina atualmente tem sido de 20 anos (Simon, 2024). Como por exemplo o caso do cobre, nos últimos 10 anos, globalmente, foram anunciadas apenas quatro novas descobertas, que são economicamente viáveis para extração. De acordo com (Simon, 2024), se o mundo atingir o “net zero em emissões”, através da eletrificação, iremos necessitar de 200 novas minas de cobre ao longo dos próximos 30 anos. Essa tendência, poderá também ser predisposta para o caso do cobalto, níquel, cobre, índio e terras raras.

Problemas de aprisionamento devido a situações geopolíticas podem ter um impacto significativo na mineração, produção e distribuição dos materiais em várias indústrias.

Nos tópicos a seguir, será analisado o comportamento de alguns dos materiais considerados como os mais críticos, nomeadamente o cobalto, cobre, níquel, lítio, índio e terras raras. Veremos como os mesmos sofreram evoluções significativas em relação à produção, e como são fortemente influenciados pela dinâmica da oferta e procura.

4.1 Cobalto

O cobalto (Co) constitui um dos metais de transição¹⁴ da tabela periódica, caracterizado por uma aparência brilhante, cinzento-prateada e é conhecido pela sua dureza e capacidade de manter a resistência a altas temperaturas (Helmenstine, 2021). Este elemento é ferromagnético, o que significa que pode ser magnetizado e apresenta propriedades magnéticas semelhantes às do ferro e do níquel (Britannica, 2024). Apresenta um ponto de fusão de 1495 °C, relativamente elevado em comparação com muitos outros metais, e seu ponto de ebulição é de aproximadamente 2927 °C (Lenntech, 2024).

O cobalto é um metal denso. À temperatura ambiente (cerca de 25 °C ou 77 °F) e à pressão atmosférica normal, o cobalto tem uma densidade de cerca de 8,9 *gramas por centímetro cúbico* (g/cm³), semelhante à do ferro, níquel, cobre e manganês.

4.1.1 Aplicabilidade do cobalto

O cobalto é um metal utilizado em diversas aplicações comerciais, industriais e militares, muitas das quais são estratégicas e críticas.

A procura por esse material não é, contudo, nova. O cobalto desempenhou um papel importante durante a Revolução Industrial, principalmente devido à sua utilização em ligas de metais, em particular na produção de aço de alta resistência. Durante este período, a procura de materiais mais resistentes e duradouros foram essenciais para a construção de máquinas, motores e infraestruturas. Mais recentemente, entretanto, o espectro de aplicações do cobalto alterou-se significativamente em consequência da introdução das fontes de energia alternativas. Atualmente, 55% da aplicação do cobalto é usado na fabricação de baterias, e os outros 45% estão distribuídos pelas outras áreas, como pode-se observar na figura 17.

¹⁴ Metais de transição (ou elemento de transição), são os elementos que se enquadram entre os grupos 3 e 12 da tabela periódica, também conhecidos como elementos do bloco d, (Xometry, 2024).

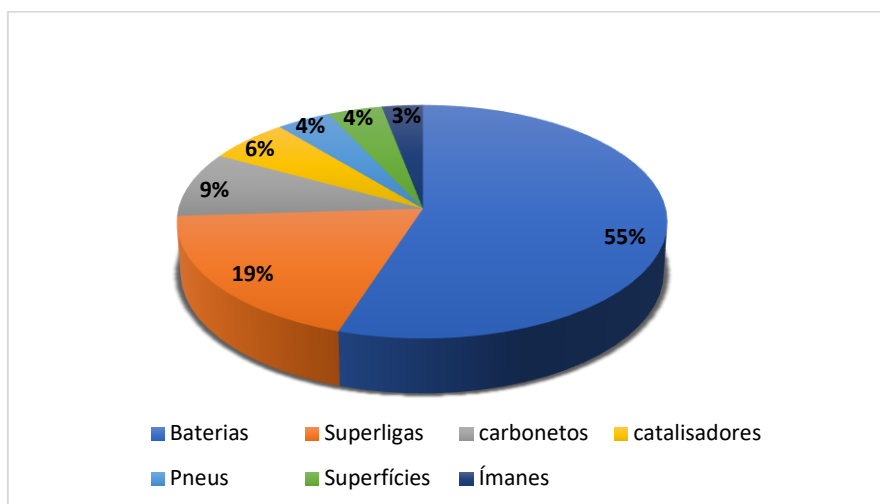


Figura 17- Aplicabilidade do cobalto (Sokhna et al, 2021).

4.1.2 O cobalto na transição energética

Embora a utilização generalizada de tecnologias hipocarbônicas na transição energética pareça reduzir a dependência dos combustíveis fósseis, pode, na realidade, criar outras dependências, uma vez que as energias renováveis e a mobilidade elétrica são muito intensivas em materiais. O cobalto é um metal privilegiado da transição energética, podendo ser identificado e considerado crítico em mais de um aspecto (serão referidos ao longo desse subcapítulo).

A evolução da produção de cobalto reflete a interação dinâmica de forças históricas, tecnológicas e económicas. Desde a sua descoberta, há séculos, até ao seu papel fundamental nas indústrias modernas, o cobalto continua a moldar o mundo em que vivemos. À medida que enfrentamos os desafios do século XXI, é imperativo assegurar uma cadeia de fornecimento de cobalto sustentável e ética para satisfazer as exigências de um mundo cada vez mais interligado e consciente dos recursos.

De um modo geral, a produção do cobalto tem evoluído consideravelmente ao longo dos anos em resposta à dinâmica do mercado, sobretudo no setor energético. As pesquisas sobre as baterias de íons de lítio iniciaram na década de 1980 (Yoshino, 2014), e em 1990, o desenvolvimento e a utilização das baterias de lítio-cobalto, promoveram uma elevada procura pelo cobalto (Graedel et al, 2022). Por conseguinte, a sua adoção generalizada e o seu domínio nas baterias ocorreram principalmente na década de 2000, como pode-se constatar na figura 18, pois é justamente nesse ano que a curva começa a disparar.

De acordo com a (USGS, 2024), em 2023 a produção mundial do cobalto foi cerca de 230 000 toneladas métricas. Com base nos valores históricos passados, e auxílio da ferramenta Excel, foi possível obter automaticamente uma projeção futura de como será a produção do cobalto até 2050. Em relação aos dados obtidos de 2023 a 2050, poderá haver uma taxa de crescimento até 60%. Desta forma, conclui-se que o total a ser produzido cumulativamente até 2050 corresponde a um total de 7 696 501 toneladas métricas de cobalto globalmente.

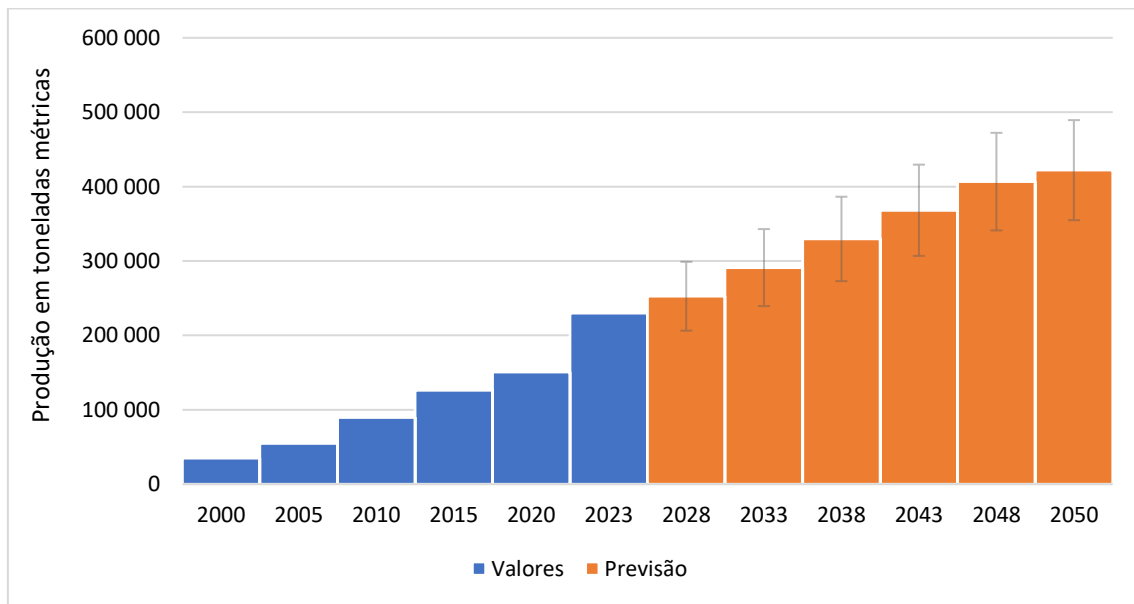


Figura 18-Histórico e projeção futura da produção global do cobalto ao longo dos anos (USGS, 2024)

Uma vez que o cobalto é um elemento fundamental em diferentes domínios, coloca-se a questão de saber se a oferta de cobalto pode satisfazer a procura mundial em todos os setores a médio e longo prazo (Sokhna et al, 2021). De acordo com a (USGS, 2024), as reservas mundiais identificadas de cobalto terrestre são de cerca de 11 milhões de toneladas. Levando em conta o nível atual de produção e sua linearidade, conforme ilustrado anteriormente na figura 18, essas reservas seriam suficientes para pouco mais de 47 anos. Segundo a (USGS, 2024), atualmente dispomos de aproximadamente 25 milhões de toneladas em recursos. Assim, ao somarmos as reservas e os recursos, podemos adicionar mais de cem anos aos 47 anos previstos. Vale ressaltar que os recursos podem estar presentes em quantidades insuficientes no minério, ou com qualidade inadequada, assim como podem estar localizados em áreas de difícil acesso podendo ser economicamente inviáveis para exploração. Logo, não podemos seguir uma estratégia para mobilidade elétrica, com dados que são apenas suposições.

Mas se considerarmos a sua utilização intensiva em baterias e o número de baterias ainda necessárias para eletrificar toda a gigantesca frota de automóveis, navios e aviões, podemos concluir que haverá problemas no abastecimento dentro de alguns anos, se não forem encontradas alternativas ao cobalto ou meios eficazes de reciclagem. Além disso, a grande maioria destes recursos está localizada no Copperbelt, uma zona mineira que inclui parte da província de Kantanga, na República Democrática do Congo (RDC), que constitui o minério de maior grau (3% de cobalto), quando comparado com a média mundial de cerca de 0,6% a 0,8%. Mas a atividade mineira na RDC é largamente controlada por duas grandes empresas chinesas, bem como por outras empresas menores da Rússia e do Reino Unido. Os outros recursos menores restantes estão localizados principalmente na Indonésia, Rússia, Austrália, Canadá e Estados Unidos. Atualmente, 130.000 toneladas métricas provêm da RDC e apenas 10.000 da Indonésia, 9.000 da Rússia e 6.000 da Austrália, o que nos dá uma ideia clara da criticidade geopolítica. Outros 120 milhões de toneladas de cobalto também poderiam ser encontrados no fundo dos oceanos Atlântico, Índico e Pacífico (USGS, 2020). No entanto a sua extração ainda não é viável devido a significativas barreiras tecnológicas, económicas e jurídicas. (Sokhna et al, 2021).

Um estudo recentemente realizado por (Sokhna et al, 2021) alerta para alguns desafios que o cobalto poderá enfrentar ao longo dessa jornada energética, demonstrando que as reservas de cobalto são suscetíveis de se esgotar antes de um sistema de energias renováveis poder ser implementado em grande escala em 2050. Apesar da sua importância, existem preocupações quanto ao provisionamento ético e sustentável do cobalto. O risco de provisionamento existe nas fases de extração e de refinação, principalmente devido ao fato do cobalto ser principalmente um subproduto da mineração de outros metais. O principal desafio decorrente do estatuto do cobalto como material subproduto reside na sua forte dependência da extração sobretudo do cobre e níquel, onde 44% da sua extração provém da exploração do cobre, enquanto os restantes 50% deriva da exploração do níquel e os outros 6% procede de operações mineiras em que o cobalto é o produto principal (Dias et al, 2018). Esta interdependência cria vulnerabilidades inerentes à cadeia de abastecimento do cobalto. As flutuações na procura de metais primários podem ter um impacto direto na produção de cobalto, conduzindo a escassez ou excedentes de oferta.

De acordo com o USGS (2021), esta dependência do cobalto como subproduto influenciou a volatilidade dos preços do cobalto ao longo dos anos, como se pode ver no comportamento de "gangorra"¹⁵ apresentado na figura 19.

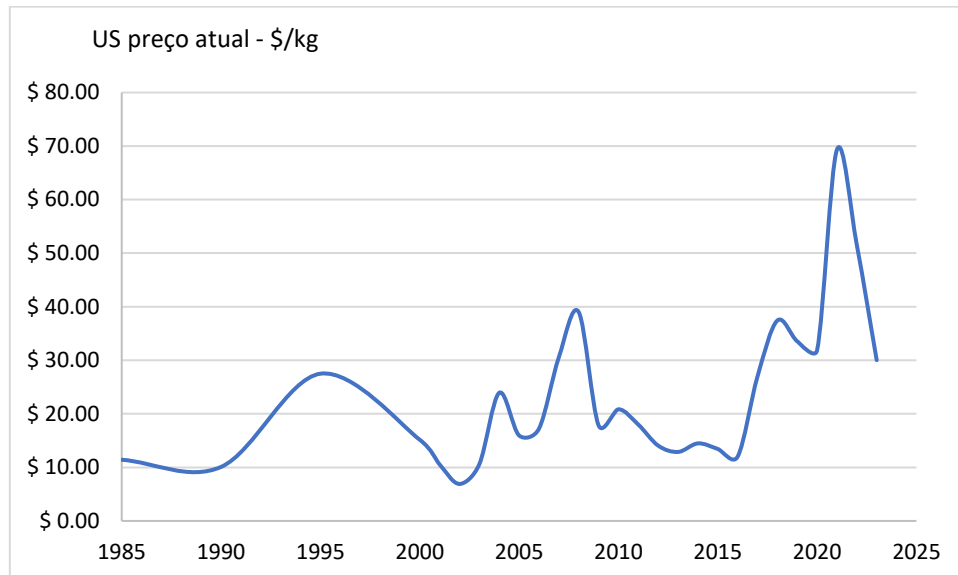


Figura 19-Volatilidade do preço do cobalto no prazo 1985 - 2023 (média anual). Fonte: USGS, 2021 e Ycharts, 2023

Mediante ao cenário da elevada produção do cobalto, e a todos outros fatores até então mencionadas, na retaguarda subsistem outros sérios problemas, que são frequentemente ignorados e colocados de lado. Bem sabemos que para haver mineração, como resultado, haverá desflorestamento, logo, os impactos ambientais e sociais causados poderão ser irreversíveis. As partículas emitidas durante a mineração do cobalto consistem em emissões radioativas, que podem causar cancro e uma série de outros problemas à saúde humana (Farjana et al, 2019). Outro fator preocupante e considerável tem a ver com a exploração dos trabalhadores, particularmente em regiões como a RDC, que representa uma parte significativa da produção global de cobalto. Os relatos de trabalho infantil, condições de trabalho insalubres e salários baixos são generalizados, levantando preocupações sobre violações dos direitos humanos e práticas éticas de abastecimento na cadeia de fornecimento do cobalto.

¹⁵ Gangorra refere-se ao comportamento oscilatório dos preços.

Pouco se fala a respeito desses transtornos sociais, sobretudo o trabalho infantil nas minas, pois atualmente, lamentavelmente, o foco tem sido uma transição energética “limpa”, e como podemos afirmar que essa transição será realmente limpa, se há tantos problemas associados? No Copperbelt, 28% da mão de obra, ou seja, entre 19.000 e 30.000 trabalhadores das minas, são crianças com menos de 15 anos, algumas das quais com apenas 6 anos de idade. Outros 14%, entre 9.000 e 15.000 trabalhadores, têm entre 15 e 17 anos (Tsurukawa et al, 2011), (Faber et al, 2017).

Os esforços para atenuar o impacto ambiental da extração de cobalto incluem o desenvolvimento de práticas mineiras mais sustentáveis, a aplicação de regulamentos ambientais mais rigorosos e a exploração de materiais alternativos para a produção de baterias. Além disso, a reciclagem de cobalto e a utilização de tecnologias de baterias sem cobalto estão a ser exploradas como formas de reduzir a dependência da extração desse material.

4.2 Cobre

O cobre (Cu) é um dos metais mais antigos conhecidos pela humanidade, desempenhando um papel importante no desenvolvimento das civilizações antigas. A importância acentuou-se durante a Idade do Bronze (cerca de 3500 a 1200 a.C.), um período caracterizado pela utilização generalizada do bronze, uma liga de cobre e estanho.

Embora seja o terceiro metal mais utilizado do mundo (USGS, 2024), o mesmo é relativamente escasso na crosta terrestre, que contém apenas 50 a 100 partes por milhão (ppm) de cobre (Roig, 2024). Os depósitos de Cu não estão distribuídos uniformemente pelo mundo. Muitos dos maiores depósitos encontram-se concentrados em certas regiões geográficas, como veremos mais a frente no tópico 4.2.2, podendo ser classificado como um material crítico diante deste cenário.

4.2.1 Aplicabilidade do cobre

O cobre encontra inúmeras aplicações em várias indústrias devido à sua excelente condutividade térmica e elétrica, ductilidade, maleabilidade, durabilidade, reciclabilidade, resistência à corrosão, boas propriedades antimicrobianas e capacidade de liga. Atualmente, a maior parte do cobre é utilizada em equipamentos elétricos (cerca de 44% em cablagem, transformadores, transmissão e geração de energia), maquinaria industrial (10%, permutadores de calor), construção (20%, coberturas e canalizações), eletrodomésticos e eletrônica (14%), e transportes (12%) (International Copper Association, 2024).

4.2.2 O cobre na transição energética

A mudança global para fontes de energias renováveis chamou a atenção para o papel crítico do cobre na transição energética. Como anteriormente visto, o Cu é um metal versátil e serve como pilar em várias tecnologias e infraestruturas. Este subcapítulo tem como principal objetivo investigar a crescente procura do cobre, impulsionada pelas aplicações de energias renováveis e destacar os principais setores que dependem deste mineral.

O cobre é um metal primário, que pode ser encontrado na natureza como metal puro (cobre nativo), mas a grande maioria dos minérios atualmente em exploração são sulfuretos de cobre, com alguns carbonatos e óxidos de cobre. A extração de sulfuretos de cobre de minas a céu aberto oferece o maior teor de cobre (cerca de 0,4 a 1,0 %), quando comparado com outros minérios não sulfuretos. Existem operações de extração de cobre em vários países, mas o Chile é atualmente o maior produtor (um quarto da produção mundial), logo seguido do Peru e RDC¹⁶. Os números para 2023 (USGS, 2024) indicam uma produção mundial de cerca de 22 milhões de toneladas métricas, com o Chile a produzir cerca de 5 milhões de toneladas, o Peru 2,6 milhões, a RDC 2,5 milhões, a China 1,7 milhões, os EUA 1,1 milhões e a Rússia 900 mil toneladas. O Cazaquistão é também um importante produtor com cerca de 600 mil toneladas no ano passado. No que respeita ao consumo, a China é atualmente o maior consumidor de cobre, com uma quota

¹⁶ Tal como observado no caso do cobalto, a razão para a sua extração principalmente dos minérios de cobre da RDC (Copperbelt) deve-se ao teor de cobalto mais elevado destes minérios (cerca de 3%) em comparação com qualquer outro minério de cobre no mundo (todos com menos de 1%).

de cerca de 50%, correspondendo a mais de 10 milhões toneladas, seguida da União Europeia, num distante segundo lugar.

Em aproximadamente 50 anos, a taxa de crescimento da produção mundial do cobre cresceu 235%. Ao realizar um levantamento na base de dados em relação à produção, é possível obter uma projeção cumulativa de 748 milhões de toneladas métricas entre 2024 e 2050. Vale ressaltar que essa previsão poderá ocorrer se a taxa de produção permanecer de forma linear como podemos ver na figura 20.

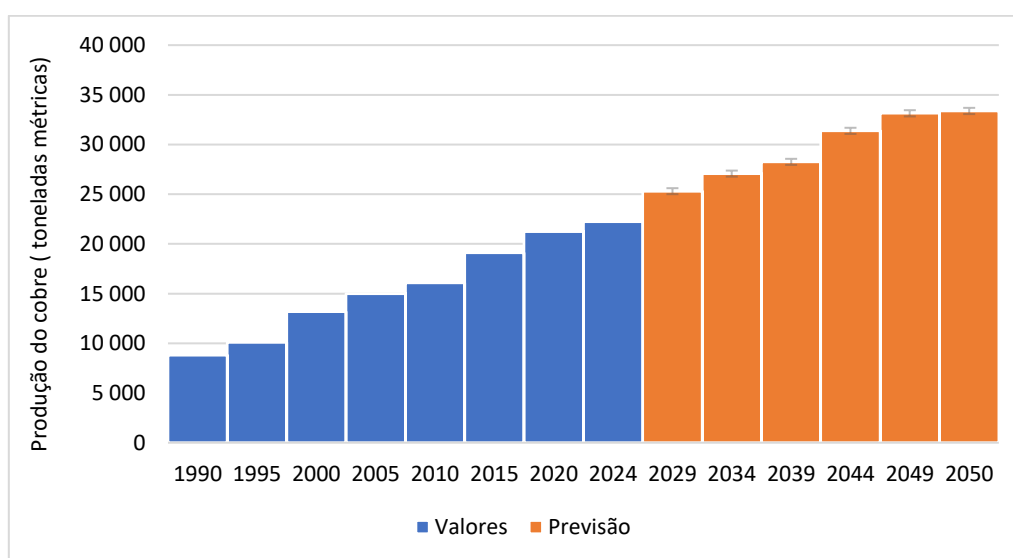


Figura 20-Histórico e projeção da produção mundial de cobre (USGS, 2021)

De acordo com (Venditti, 2021), a figura 21 destaca como se espera que a procura global de cobre, tanto nos setores de energia como nos setores de transportes, dupliquem nas próximas décadas. As novas tecnologias energéticas, contudo, requerem ainda mais cobre do que as fontes de energias convencionais. Os sistemas de energia solar fotovoltaica contém aproximadamente 5 toneladas (t) de cobre por megawatt (MW) produzido, enquanto as instalações de armazenamento de energia da rede dependem de 2,7 a 3,6 t por MW. A figura 21 ilustra o salto esperado na procura global de cobre apenas para fontes de energias alternativas, de 210 mil toneladas em 2020 para 1,8 milhões de toneladas em 2030. No topo dessa figura, o autor rotula o cobre como "O Metal Essencial para a Transição Energética", destacando a sua utilização em redes elétricas, baterias de VE, turbinas eólicas, painéis solares e infraestruturas de carregamento de VE. Salienta que um carro a gasolina utiliza cerca de 20 kg de cobre, principalmente em cablagens, enquanto um carro totalmente elétrico possui cerca de 80 kg de cobre. Ainda na mesma figura, há uma nota no lado direito que indica que a procura de cobre para carregamento

de veículos eléctricos deverá aumentar mais de 1.000% até 2030, em comparação com 2020. Na tabela 8 encontram-se os valores associados às quantidades de cobre necessárias para os diferentes tipos de energias até então mencionadas.

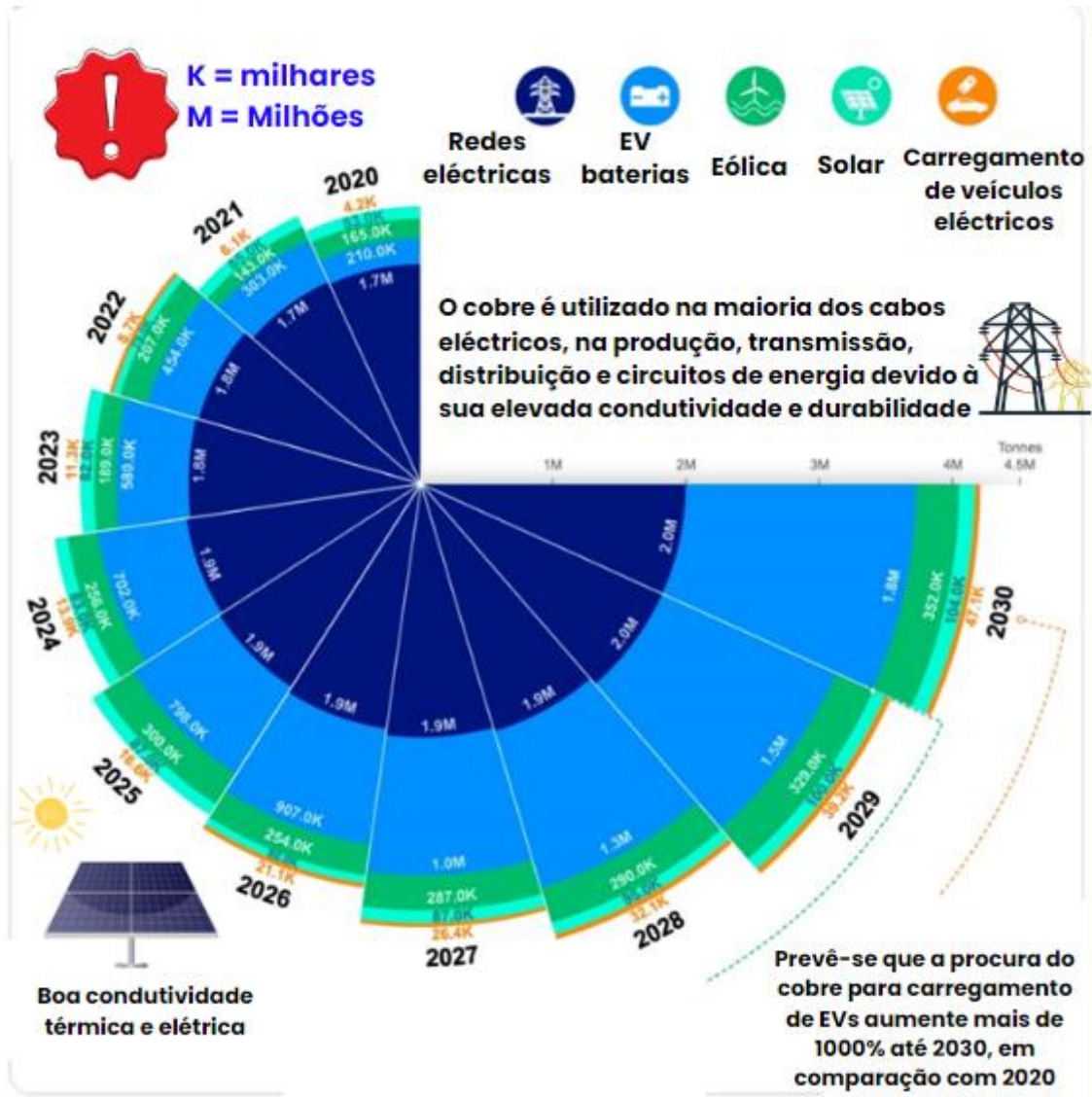


Figura 21-procura do cobre em um futuro movido por energias renováveis (Venditti, 2021)

Tabela 9-Quantidade de cobre utilizada na obtenção das energias renováveis até 2023 e previsão até 2030 (Venditti, 2021)

Ano	Redes Elétricas (t)	Baterias EV (t)	Vento (t)	Solar (t)	Carregamento de veículos elétricos (t)
2020	1,7 M ¹⁷	210 K ¹⁸	165 K	83 K	4,2 K
2021	1,7 M	303 K	143 K	85 K	6,1 K
2022	1,8 M	454 K	207 K	79 K	8,7 K
2023	1,8 M	580 K	189 K	82 K	11,3 K
2024	1,9 M	702 K	256 K	83 K	13,9 K
2025	1,9 M	798 K	300 K	87 K	16,6 K
2026	1,9 M	907 K	254 k	80 K	21,1 K
2027	1,9 M	1,0 M	287 K	87 K	26,4 K
2028	1,9 M	1,3 M	290 K	95 K	32,1 K
2029	2,0 M	1,5 M	329 K	100 K	39,2 K
2030	2,0 M	1,8 M	352 K	104 K	47,1 K

A perspectiva de um rápido aumento na procura do cobre coloca enormes questões sobre a disponibilidade e fiabilidade do seu fornecimento. As atuais reservas de cobre existentes estão estimadas em cerca de 890 milhões de toneladas (Statista, 2022), o que, considerando apenas o atual nível de produção (22 milhões de toneladas), seria suficiente para apenas 40 anos (caso essa tendência cresça de forma linear, como verificado na figura 20), ou talvez um pouco mais, se considerarmos a sua facilidade de reciclagem (atualmente cerca de 8,7 milhões de toneladas, ou seja, cerca de 40% da produção global). Portanto, o cobre é de fato um material crítico, não por razões geopolíticas, mas principalmente devido à disponibilidade limitada de reservas facilmente acessíveis. Por esta razão, a exploração de nódulos marinhos polimetálicos tem sido seriamente considerada. Estes nódulos, localizados nas profundezas do Oceano Pacífico (a cerca de

¹⁷ Unidade em milhões de toneladas.

¹⁸ Unidade em milhares de toneladas.

3.000 a 6.500 metros abaixo do nível do mar), contêm outros metais valiosos, como o já referido cobalto e também o níquel.

Assim como no caso do cobalto, o preço do cobre também apresenta um alto nível de volatilidade, como pode-se verificar na figura 22, uma característica comum a todos os mercados de ‘commodities’ não renováveis, uma tendência que tem aumentado nos últimos vinte anos (Diaz et al., 2021).

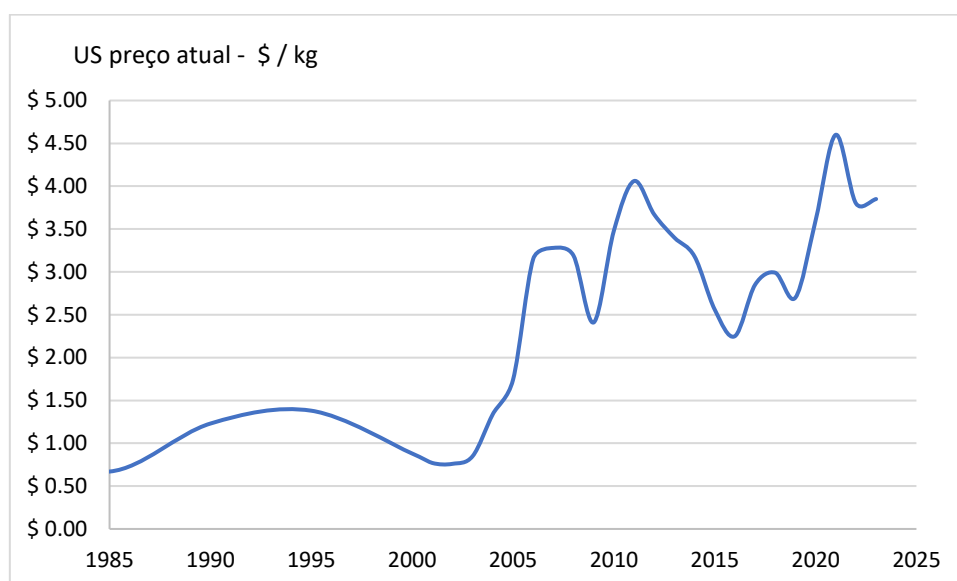


Figura 22-Volatilidade do preço do cobre entre o período de 1985 a 2023 (média anual). (USGS, 2021 e Ycharts, 2023).

No passado, as tensões no equilíbrio entre oferta e a procura de diferentes minerais levaram a investimentos adicionais, bem como a medidas para modelar ou substituir a procura, mas estas respostas surgiram com defasamentos temporais e foram acompanhados por uma volatilidade considerável dos preços. Episódios semelhantes poderão acontecer futuramente com o cobre, devido sua elevada procura (IEA, 2021).

Embora o cobre seja um material 100% reciclável (Association, 2021), a reciclagem por si só, poderá não ser suficiente para satisfazer a procura e garantir um fornecimento estável do cobre. Para atender a esta procura, é provável que haja um aumento do investimento em mineração, exploração e desenvolvimento de novas minas. Além disso, as políticas podem desempenhar um papel fundamental na preparação para o rápido crescimento dos volumes de resíduos, incentivando a reciclagem de produtos que chegam ao fim da sua vida útil, apoiando atividades de recolha, triagem e financiamento de Investigação e Desenvolvimento (I&D) em novas tecnologias de reciclagem (IEA, 2021).

Para além da preocupação relativamente ao fornecimento do cobre, os impactos ambientais também tem sido alvo de destaque no meio político e social. Existem muitos impactos negativos decorrentes da extração do minério de cobre, dentre os quais podemos destacar: impacto visual, em virtude da extração do minério e disposição de estéril; impacto pela poluição da água e solo decorrente de dejetos orgânicos, óleos/detergentes, metais pesados (mercúrio, arsénio, cádmio), ácido sulfúrico, entre outros; impacto pela poluição do ar devido emissão de material particulado produzido em virtude da detonação das rochas, movimentação de caminhões e máquinas, ação dos ventos nas frentes da lavra, britagem e moagem por ocasião da etapa de beneficiamento dos minérios e por poluentes gasosos provenientes da queima de óleos combustíveis, tais como Dióxido de Carbono (CO₂), Óxido de Nitrogénio (NO_x) e Óxidos de Enxofre (SO_x), (Mendes et al, 2010). Cumpre também mencionar os impactos relativos aos ruídos advindos de detonações, compressores, britadores, moinhos, bombas, locomotivas, tratores, exaustores, etc. Impactos relativos às vibrações provenientes das detonações para desmanche de rochas, máquinas de terraplenagem, britadores e peneiras vibratórias (Mendes et al, 2010).

É de extrema importância que as partes interessadas na transição energética reconheça a relevância de práticas mineiras mais responsáveis, de forma minimizar os impactos ambientais e sociais.

4.3 Níquel

O níquel é também um metal primário que pode ser encontrado na natureza como metal nativo, e os seus minérios foram confundidos com minérios de cobre desde a antiguidade. Alguns bronzes primitivos fundidos no Crescente Fértil por volta de 3500 a.C. contêm cerca de 2% de níquel e moedas de cuproníquel foram usadas na China por volta de 1400 a.C. Como referido anteriormente, os minérios de níquel são também explorados para obtenção do cobalto (cerca de 50% da produção mundial de cobalto) (Dias et al, 2018).

4.3.1 Aplicabilidade do níquel

O níquel é um metal de transição que possui uma ampla gama de aplicações devido às suas propriedades físicas e químicas, como resistência à corrosão, ductilidade, e capacidade de formar ligas com outros metais. Na tabela 10 estão algumas das principais áreas de aplicabilidade do níquel (Dilshara et al, 2024).

Tabela 10-Propriedades e aplicações do níquel (Dilshara et al, 2024)

Áreas de aplicações	Propriedades	Teor de Ni (wt%)	
Aço inoxidável	Boa conformabilidade e ductilidade Elevada capacidade de soldadura Boa tenacidade Elevado ponto de fusão ~ 1453 °C Ponto de ebulição ~ 2913 °C Resistência à corrosão Quimicamente não reativo	Tipo 304	8 - 10
		Tipo 316	10 - 14
Material catódico de baterias recarregáveis	Reciclável Elevada densidade energética Melhorar a capacidade de armazenamento de energia	Lítio Níquel Cobalto Alumínio (NCA)	80
		Lítio Níquel Manganês Cobalto (NMC)	33
Ligas	Escalonamento a alta temperatura (High temperature scaling) Memória de forma (Shape memory) Baixa expansão Boa condutividade térmica 97,5 Wm ⁻¹ K ⁻¹ Resistência à corrosão por CO ₂ e H ₂ S Alto ponto de fusão ~ 1453 °C	Cu - Ni	2 - 45
		Ni - Cr - Fe	35 - 60
		Ni - Cr - Si	70 - 80
		Ni - Cr - Al	35 - 95
Revestimento	Resistente à corrosão e ao desgaste Proporciona um acabamento brilhante e atrativo	Zn- Ni Revestimento	12 - 15

De acordo com (Statista, 2024), a indústria de aço inoxidável foi responsável por 65% do consumo primário de níquel globalmente. As baterias, especialmente as de íons de lítio utilizadas em veículos elétricos e dispositivos eletrônicos, foram responsáveis pela segunda maior fatia desse consumo, com 15%. Isso destaca a importância do níquel tanto na produção de aço inoxidável, quanto no setor de tecnologia e mobilidade, como podemos ver na figura 23.

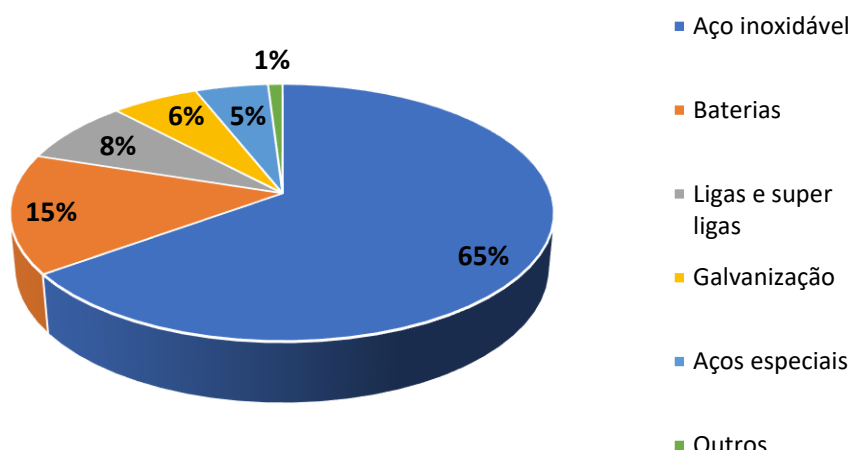


Figura 23- Aplicabilidade do Níquel (Statista, 2024)

4.3.2 O níquel na transição energética

No contexto das energias renováveis e materiais críticos para as emissões nulas de carbono, o níquel (Ni) desempenha também um papel fundamental e desafiador neste cenário evolutivo energético. O Ni tornou-se recentemente um metal crítico devido ao aumento das aplicações numa ampla gama de setores, incluindo engenharia, transportes, arquitetura, construção civil e, especialmente, na indústria de energia “limpa” (Dilshara et al, 2024).

O níquel tem sido amplamente utilizado em baterias, primeiro em baterias de níquel-cádmio, cuja adoção foi abandonada em muitos países após 2006, principalmente na Europa, e largamente substituída pelas baterias recarregáveis de níquel-metal-hidreto (NiMH), mais duradouras, que foram introduzidas no mercado na década de 1980, amplamente adotadas em ferramentas elétricas e nas primeiras câmaras digitais. Rapidamente, essa adoção evidenciou o seu potencial para todos os tipos de dispositivos portáteis, que fazem agora parte do nosso quotidiano. A partir de meados da década de 1990, surgiu a utilização de baterias de íões de lítio com cátodos de hidróxido de níquel no mercado dos automóveis elétricos.

A principal vantagem da utilização do níquel nas baterias é o fato de promover uma maior densidade energética e uma maior capacidade de armazenamento a um custo mais baixo. Os novos avanços nas tecnologias das baterias que contêm níquel significam que este elemento está destinado a desempenhar um papel cada vez mais importante nos sistemas de armazenamento de energia, ajudando a tornar mais competitivo o custo de cada kWh de armazenamento de energia em baterias. Paralelamente a esta quota de mercado crescente, a tecnologia das baterias também está a avançar, outra razão pela qual a proporção de baterias de íões de lítio contendo níquel em utilização deverá aumentar. Dois dos tipos de baterias mais utilizados, as de níquel-cobalto-alumínio (NCA, a mais utilizada pela Tesla) e as de níquel-manganês-cobalto (NMC) utilizam 56% e 33% de níquel, respetivamente, mas os novos desenvolvimentos de baterias NMC estão também a aproximar-se dos 80% de níquel.

Em cerca de 33 anos, a produção global de níquel aumentou 270%. Um levantamento dos dados de produção permite-nos projetar que entre 2024 e 2050, serão produzidas cumulativamente 94,3 milhões de toneladas métricas. É importante destacar que essa previsão se baseia na suposição de que a taxa de produção mantenha a tendência linear, conforme ilustra a figura 24.

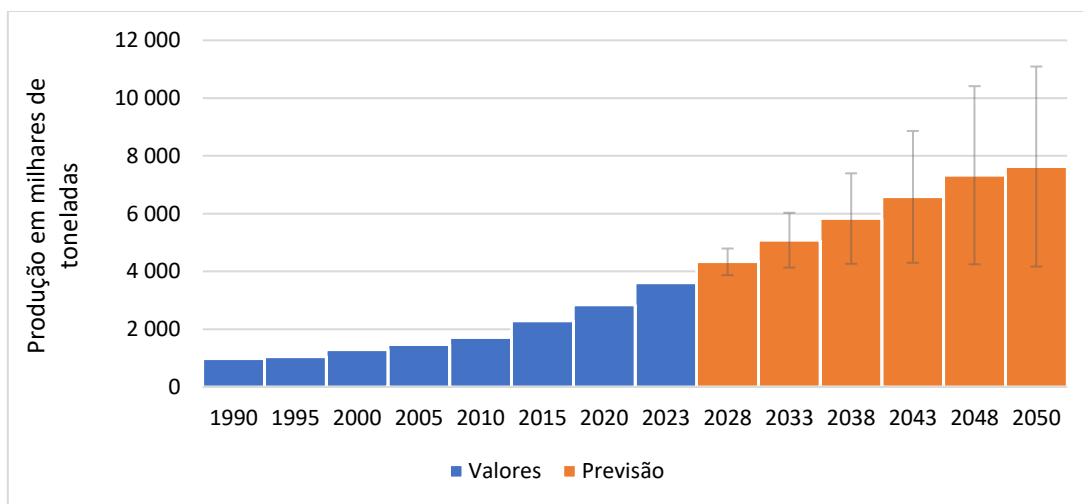


Figura 24-Histórico e projeção da produção mundial do níquel a partir 1990, (USGS, 2023) e (Statista, 2024).

A maior parte do níquel extraído provém de dois tipos de minérios: laterite (uma mistura complexa de hidróxidos (Fe, Ni) e silicatos) e depósitos magmáticos de sulfuretos (Fe, Ni). A Indonésia é o líder mundial com 1.600 mil toneladas (45%), seguida de longe pelas Filipinas (330 mil toneladas), Rússia (220 mil toneladas), Nova Caledónia (França) (190 mil toneladas), Austrália (160 mil toneladas) e Canadá (130 mil toneladas). As duas maiores minas de níquel estão situadas na Rússia - a Kola MMC Miine (Murmansk) e a Sorowako Mine (sul de Sulawesi) (GolbalData, 2023).

Os depósitos de sulfetos encontram-se frequentemente em camadas subterrâneas profundas e estão normalmente associados a menores impactos ambientais em termos de extração, uma vez que o níquel pode ser mais facilmente separado do minério. A extração e o processamento dos sulfetos de níquel são geralmente menos intensivos em termos energéticos do que as laterites. Os depósitos de laterites, por outro lado, formam-se em climas tropicais e são extraídos de depósitos superficiais. As laterites requerem processos mais complexos e intensivos em energia para extrair o níquel, afetando significativamente a sua pegada de carbono. Os dois principais métodos de processamento dos minérios lateríticos são o pirometalúrgico (fundição a alta temperatura, muitas vezes referida como processo RKEF¹⁹, Rotary Kiln Electric Furnace) e o hidrometalúrgico (lixiviação ácida sob alta pressão, HPAL²⁰). Ambos os métodos são intensivos em energia, mas o HPAL, em particular, requer uma quantidade significativa de energia para manter a alta pressão e temperatura necessárias para lixiviar o níquel do minério, levando a maiores emissões de GEE. Estima-se que, por cada tonelada de níquel produzida através da lixiviação ácida de alta pressão (HPAL), são também produzidas cerca de 1,4 a 1,6 toneladas de resíduos (Wyloo, 2024).

¹⁹ O forno elétrico rotativo (RKEF) é um sistema utilizado para processar minérios lateríticos, especialmente no contexto da produção de ferroníquel. Nesse processo, o minério de níquel é submetido a diferentes etapas dentro do RKEF para extrair o níquel e produzir a liga de ferroníquel. As principais etapas do processo são: secagem, calcinação, redução, refinamento e redução (Romero et al, 2022).

²⁰ O processo de lixiviação ácida de alta pressão (HPAL) é uma técnica utilizada para extrair níquel e cobalto de minérios lateríticos. Esse processo envolve a lixiviação do minério com ácido sulfúrico em condições de alta pressão e temperatura, o que permite a dissolução dos metais num recipiente de alta pressão ou temperatura (autoclave) e posteriormente realizando um processo de extração da solução concentrada para obtenção de minerais mais puros (HPAL, 2022).

As estimativas das reservas mundiais de níquel, 60% de depósitos lateríticos e 40% de depósitos de sulfuretos (USGS, 2023), ascendem a 100 milhões de toneladas métricas, o que, tendo em conta o volume de produção atual de 3.6 milhões de toneladas (USGS, 2024), mal daria para os próximos 30 anos. Se tivermos em conta a procura crescente atualmente observada, a situação futura do aprovisionamento está seriamente ameaçada, apesar de o níquel, tal como o cobre, ser um metal facilmente reciclável (atualmente, cerca de 350 000 toneladas de níquel são recuperadas a partir de sucata, utilizada principalmente pela indústria do aço inoxidável) (INSG, 2024). Cumpre ressaltar, entretanto, que se levarmos em conta a quantidade de reservas atuais, mais os recursos estimados de 350 milhões de toneladas (Níquel Institute, 2024), teremos cerca de 450 milhões de toneladas. Desta forma poderemos dilatar o horizonte de esgotamento desse material para cerca de um século.

Tal como no caso do cobre, a criticidade do níquel não é de natureza geoestratégica, mas deve-se essencialmente à escassez de reservas minerais com um bom teor (pelo menos 1%) do metal. Esta escassez constitui uma séria ameaça para o futuro dos carros elétricos, o que levou recentemente Elon Musk, CEO da Tesla, a afirmar que "a escassez do fornecimento de níquel será o problema mais preocupante da futura expansão da produção" (Junzhi, 2021), razão pela qual a Tesla está a planear, num futuro próximo, colocar em uso as novas baterias de fosfato de ferro-lítio.

O comportamento do preço do níquel é muito semelhante ao caso do cobre, evidenciando altas e baixas nos mesmos períodos e pelas mesmas causas. A figura 25 mostra o histórico do preço do níquel desde 1985. Em 2006, o preço do níquel subiu 146% em resultado do boom industrial da China e do consequente aumento súbito da procura. Em 2022, um novo pico de preços foi consequência do conflito ucraniano e das preocupações com as sanções impostas às exportações russas de níquel. Andy Home (2022), analista do comércio de metais, observa que estes choques de preços são exacerbados pelos requisitos de pureza impostos pelos mercados de metais, que impõem que apenas o grau I (99,8% de metal puro) possa ser considerado uma mercadoria indexada nos mercados cambiais, mas a maior parte da oferta mundial é constituída principalmente por ligas de ferro-níquel ou alguns compostos de níquel de grau inferior.

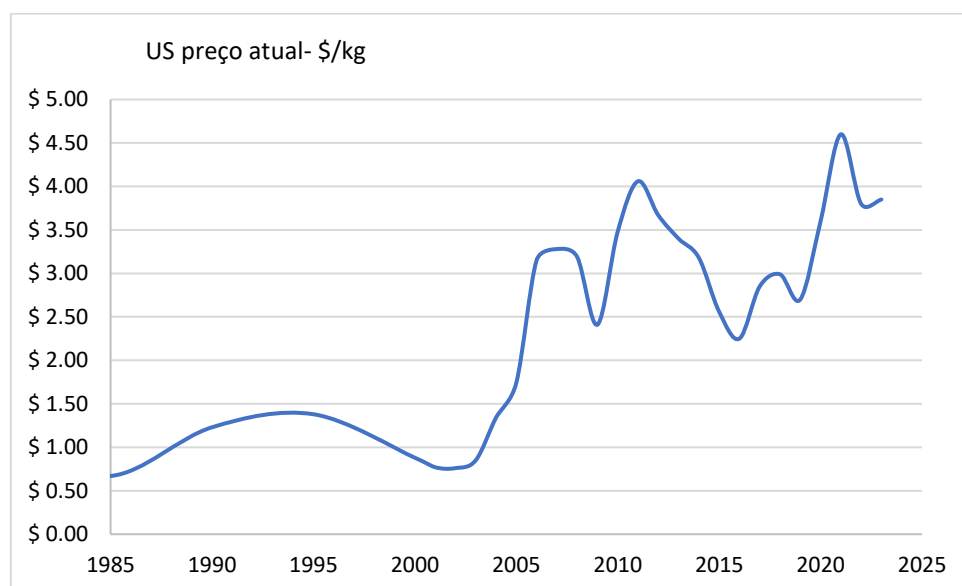


Figura 25-Volatilidade do preço do níquel no período de 1985 a 2023 (média anual). Fonte: USGS, 2021 e Ycharts, 2023.

Nas últimas duas décadas, pelo menos 76 mil hectares (aproximadamente o tamanho da cidade de Nova Iorque) de floresta foram perdidos devido a concessões de mineração de níquel na Indonésia, com uma ameaça iminente sobre mais 500 mil hectares. No entanto, não se conhece o impacto ambiental total da produção de laterite: muito poucos produtores indonésios divulgam informações ao público e a maioria (quase 80%) das minas e fábricas de transformação indonésias são propriedade de empresas da China (Wyloo, 2024).

Dada a quota dominante da Indonésia no mercado do níquel e os métodos de processamento conhecidos (RKEF + HPAL) para as suas operações atuais e planeadas, quaisquer esforços no sentido de um futuro descarbonizado não serão um esforço simples ou rápido.

E à medida que a procura por veículos eléctricos cresce gradativamente, haverá consequentemente uma procura exacerbada não só pelo níquel, mas por outros minerais que estão sendo utilizados para as tecnologias de energias renováveis. A questão que se coloca é: será o “níquel limpo”?

O conceito de "níquel limpo" vai para além da pegada de carbono dos seus processos de produção. Também engloba considerações éticas, como práticas trabalhistas, impacto na comunidade e conservação da biodiversidade. Garantir que o níquel seja "limpo" implica minimizar os danos ambientais, como implementar e aderir a padrões ambientais rigorosos para limitar a poluição, a destruição de habitats e a perda de biodiversidade.

4.4 Lítio

O lítio é o metal mais leve do mundo, com uma densidade de $0,53 \text{ g/cm}^3$, comparável à madeira do pinho. É o menos denso de todos os elementos sólidos à temperatura ambiente (Dusukov, 2022). Um metal macio, branco-prateado (Sterba, 2019), que pertence ao grupo dos metais alcalinos da tabela periódica (Sterba, 2019). O lítio provém de três fontes principais: salmouras, rocha e argila. As salmouras e as rochas são atualmente as mais exploradas das três (Matos, et al., 2020). Devido à sua elevada reatividade, o lítio só pode ser encontrado na natureza sob a forma de compostos como os silicatos, que se encontram nas rochas ígneas e na argila mineral, e os cloretos, que se encontram nas salmouras (Matos, et al., 2020).

O lítio não ocorre livremente na natureza devido à sua reatividade e solubilidade muito elevada e está amplamente distribuído no planeta. Com uma presença relativamente pequena de 20 mg de lítio por kg na crosta terrestre, o lítio assume a posição de 25º elemento mais abundante do planeta (Zavahir et al, 2021). Apesar da sua classificação, a distribuição do lítio pelas formações geológicas não equivale necessariamente a uma acessibilidade generalizada ou a uma viabilidade comercial. Esta situação paradoxal resulta do fato de que, embora numerosos depósitos e salmouras contenham lítio (Chandrasekharam et al, 2024), a maioria destas fontes contém concentrações extremamente baixas do metal, não convenientes para a exploração comercial.

4.4.1 Aplicabilidade do lítio

Até há muito pouco tempo, o lítio e os seus compostos tinham aplicações industriais limitadas, principalmente como componente de óxido em vidros e cerâmicas resistentes ao calor, graxas lubrificantes a base de lítio, aditivos fundentes para a produção de ferro e aço e, mais recentemente, no desenvolvimento de ligas avançadas de Li-Al para a indústria aeronáutica. Mas o cenário mudou radicalmente com a introdução no mercado das baterias de íões de lítio para computadores portáteis, telemóveis e veículos eléctricos.

Atualmente, 87% da produção mundial é direcionada para o setor das baterias, 4% para cerâmicas e vidros, lubrificantes e massas 2%, tratamento do ar 1%, pós para moldes de fundição contínua 1%, medicina 1%, e outras utilizações 4% (USGS, 2024).

A notoriedade do lítio é pelo fato de ter o potencial eletroquímico mais elevado de todos os metais (Sterba, 2019). Esta propriedade é utilizada principalmente em baterias recarregáveis, uma vez que estas proporcionam um armazenamento eficiente de energia (Sterba, 2019). Outras propriedades notáveis do lítio e dos seus compostos químicos são (Fox Davies Capital, 2013): um coeficiente de expansão térmica extremamente elevado, características de fluxo e catalíticas, e atuação como modificador de viscosidade em vidro fundido.

O que torna o caso do lítio diferente de outros "materiais críticos" são os problemas relacionados com as questões ambientais e, conseqüentemente, a rentabilidade do seu processamento (Benchmark, 2023). Além disso, tal como todos os metais alcalinos, o lítio é altamente reativo e inflamável, devendo ser armazenado no vácuo, numa atmosfera inerte ou num líquido inerte (querosene ou óleo mineral).

4.2.2 – O Lítio na transição energética

Como podemos ver na figura 26, a produção global de lítio teve um impulso espetacular após 2017, principalmente devido à explosão do mercado de veículos elétricos. A produção em 2023 (170 800 toneladas métricas) apresentou um aumento de 31,3% em relação a 2022, com a Austrália a apresentar-se como o maior produtor mundial (46,7%), seguida do Chile (23,8%), China (18%), Argentina (5%), Brasil (2,6%), Canadá e Zimbabué (1,8% cada). De acordo com a GlobalData, prevê-se que a produção de lítio aumente a uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de cerca de 13% até 2030 (GlobalData, 2023).

Se a procura pelo lítio permanecer a crescer de forma linear tal como podemos ver na figura 26, a produção mundial acumulada entre (2024 e 2050) poderá ser superior a 5 milhões de toneladas métricas, havendo uma taxa de crescimento de 42% em relação a 2023.

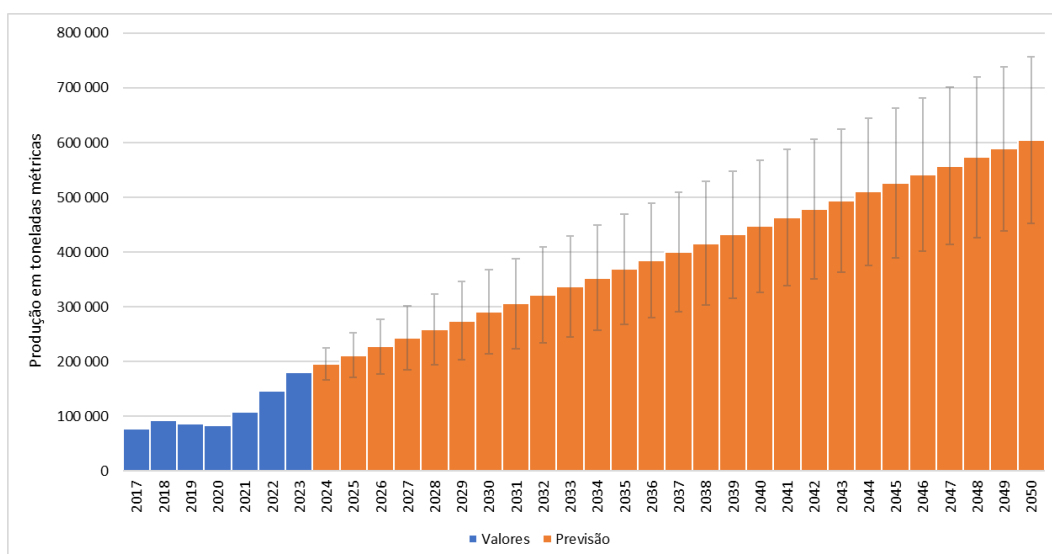


Figura 26-Produção mundial e respectiva projeção futura do lítio a partir de 2017. Dados de USGS (2022) e Statista (2023).

Visto que 87% da produção de lítio são para as baterias dos veículos elétricos, levanta-se a seguinte questão: teremos lítio suficiente para a transição energética dos veículos elétricos? Podemos fazer uma rápida verificação, considerando o número de veículos que poderemos ter com a quantidade de reserva que temos atualmente. Por exemplo: uma bateria de um EV típico tem cerca de 8 Kg de lítio (Ritchie, 2023); atualmente dispomos de 28 milhões de toneladas métricas em reservas (USGS, 2024). Neste caso, com a quantidade de reservas que dispomos, dará para fabricar 3,5 milhões de EVs. Por outro lado, existem outras estimativas de reservas menos conservadoras que apontam para as reservas globais de 98 milhões de toneladas globalmente, usando o potencial de extração de minas ainda não exploradas (Government of Canada, 2024). Neste caso, 98 milhões de toneladas de lítio daria para fabricar mais de 12 milhões de EVs.

Vale ressaltar que, conforme foi visto no item 2.3, a quantidade de lítio utilizada nas baterias depende de sua configuração, capacidade e modelo do veículo, podendo assim, esses valores serem variáveis consoantes esses fatores. A previsão do número exato de EVs que estarão nas estradas em 2050 envolve inúmeras variáveis, tais como avanços tecnológicos, alterações políticas, desenvolvimento de infraestruturas, preferências dos consumidores e fatores económicos. No entanto, de acordo com a previsão da (IEA, 2022), haverá cerca de 350 milhões de automóveis elétricos globalmente até 2030. Com base no histórico das reservas globais entre os anos 2010 e 2024 (USGS, 2024), é possível obter uma previsão futura das reservas, com o auxílio da ferramenta Excel, da quantidade de lítio que teremos prevista para 2030. Como pode ser visto na figura 27 obtém-se um valor de cerca de 42 milhões de toneladas métricas para as reservas estimadas em 2030.

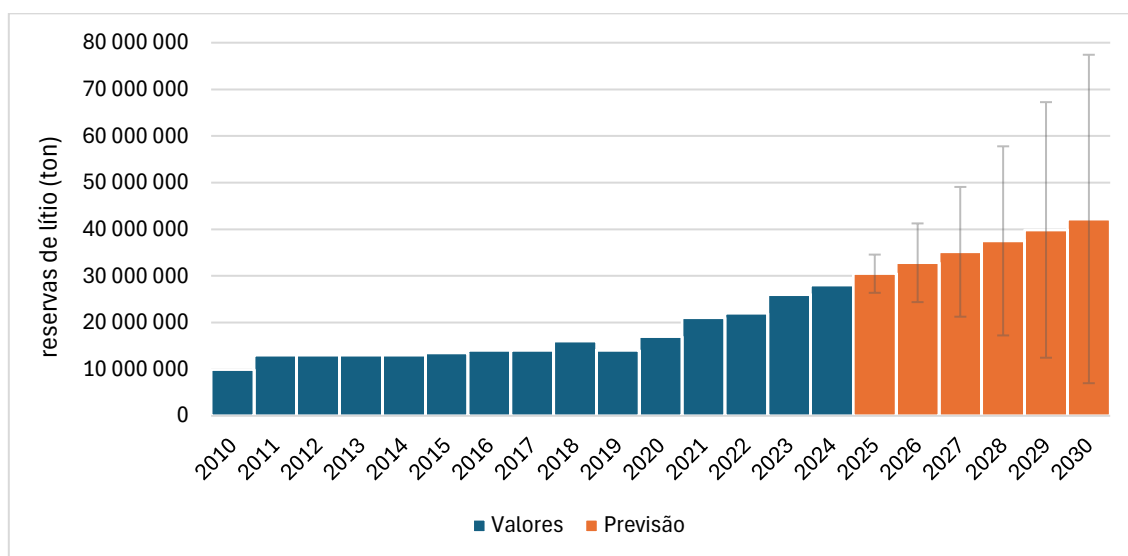


Figura 27-Histórico e projeção futura das reservas globais de lítio, entre 2010 e 2030 (USGS, 2024).

Logo, se 1 bateria comum contém cerca de 8 kg de lítio (Ritchie, 2023), 350 milhões de EVs necessitaria de aproximadamente 2,8 mil milhões de kg de lítio, ou seja 2,8 milhões de toneladas. Sendo a previsão futura de reservas na ordem de 42 milhões de toneladas conclui-se que poderá comportar essa procura para os EVs.

Vale ressaltar que atualmente temos cerca de 1,47 mil milhões de automóveis globalmente, sem contar com a quantidade de veículos sobre trilhos (comboios e metros), navios e aeronaves (Which Car, 2024). Destes 1,47 mil milhões, estima-se que atualmente 40 milhões (3%) são veículos elétricos (IEA, 2024). Assim, se subtrairmos os 40 milhões de EVs, temos um total de 1,43 mil milhões automóveis movidos a combustíveis fósseis.

Logo, para eletrificar toda a frota de 1,43 mil milhões de automóveis movidos a combustíveis fósseis, necessitaríamos de aproximadamente 11,44 milhões²¹ de toneladas de lítio. Com a disponibilidade atual das reservas e recursos, podemos prever que haverá lítio o suficiente para a mobilidade elétrica.

Embora os recursos de lítio tenham sido extensivamente explorados em algumas regiões, ainda existem áreas com recursos (minas, salinas, rochas, depósitos de salmouras, entre outras fontes) potenciais que ainda não foram exploradas. Os recursos identificados de lítio são definidos como “Recursos cuja localização, teor, qualidade e quantidade são conhecidos ou estimados a partir de evidências geológicas específicas” (Akbar, 2023).

Como vimos anteriormente no caso do cobalto, cobre e níquel, ao longo dos anos os preços desses minerais tem sofrido fortemente oscilações, essa situação também se aplica ao lítio. Ao passo que a transição energética decorre gradativamente de forma global, consequentemente a procura por esses minerais tenderá a crescer de forma exponencial ou linear, dependendo da proporção e velocidade que esse cenário alcançar.

A figura 28 revela a estreita relação entre o preço do lítio e a produção/procura. O preço começou a aumentar depois de 2015, em sintonia com o aumento da procura, também caiu em face com a produção por volta de 2020. Em 2023 podemos analisar na figura 28 que houve uma queda acentuada nos preços do lítio, esse fato pode ser atribuído principalmente à desaceleração do crescimento das vendas de veículos elétricos na China (Jennifer, 2024). E como a procura durante este ano permaneceu lenta, a oferta ultrapassou a procura, logo os preços caíram inevitavelmente. O excesso de oferta do lítio a partir de 2023 continuou a saturar o mercado no início de 2024, reduzindo os preços no primeiro trimestre de 2024 (Williams, 2024).

²¹ Esse valor foi calculado a partir da multiplicação entre a quantidade de veículos movidos a combustíveis fósseis, vezes a quantidade de lítio (8 kg) que uma bateria contém. Logo, necessitaríamos de 11,44 milhões de toneladas de lítio para eletrificar 1,43 mil milhões de veículos.

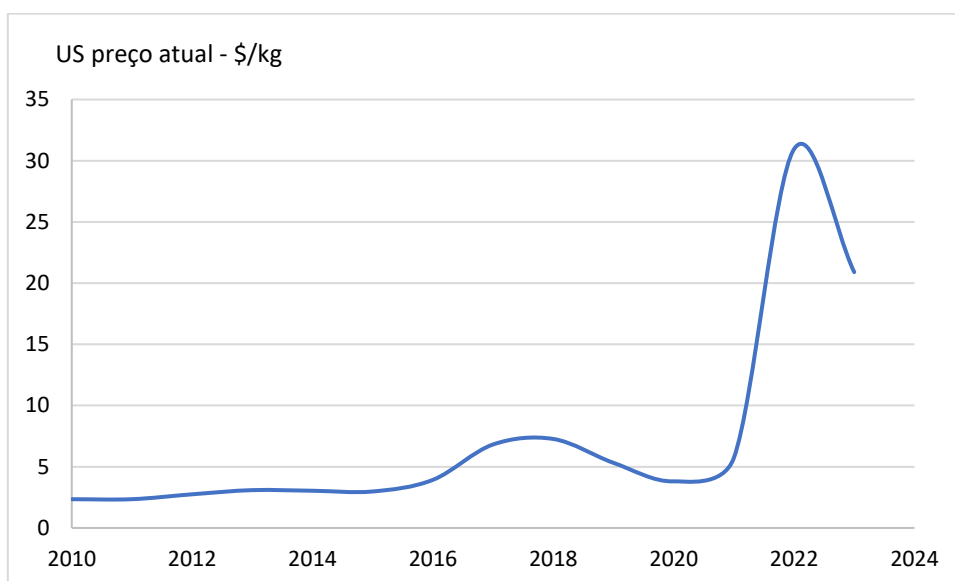


Figura 28-Comportamento do preço do lítio nos últimos anos (2010 - 2023 - média anual). Fonte: USGS, 2022 e Ycharts, 2023.

É importante ressaltar que a criticidade do lítio reside no fato deste material ser altamente reativo e inflamável. Devido à sua reatividade, o lítio requer procedimentos rigorosos de manuseio e armazenamento para evitar acidentes. Isso é particularmente importante em ambientes industriais onde o lítio é utilizado em grande escala, como na fabricação de baterias. Como também os descartes inadequados das baterias de íões de lítio podem resultar em vazamentos de produtos químicos tóxicos para o meio ambiente.

4.5 Índio

4.5.1 Aplicabilidade do índio

Para compreender o papel do índio na indústria moderna, é fundamental conhecer as suas propriedades físicas e químicas. O índio é um metal macio, prateado e maleável, com um ponto de fusão relativamente baixo $156,6^{\circ}\text{C}$ ($313,88^{\circ}\text{F}$), o que o torna adequado para uma variedade de aplicações industriais. A sua maleabilidade permite-lhe ser aplicado em filmes finos, enquanto as suas propriedades elétricas o tornam um componente valioso em dispositivos eletrônicos. Além disso, o índio é altamente resistente à corrosão, o que o torna adequado para utilização em condições ambientais adversas. Em termos de aplicabilidade, a primeira aplicação em larga escala do índio foi como revestimento de rolamentos em motores de aeronaves de alto desempenho durante a Segunda Guerra Mundial (USGS, 2024). Posteriormente, a produção aumentou gradualmente à medida que novos usos foram encontrados em ligas fundidas, soldas e componentes eletrônicos.

O índio foi descoberto pela primeira vez em 1863 pelos químicos alemães Ferdinand Reich e Hieronymous Theodor Richter (Lokanc et al, 2015), enquanto analisavam amostras de minério de zinco (Tikkanen, 2024). O índio não possui minérios próprios, atualmente cerca de 95% do índio mundial é extraído como subproduto das refinarias de zinco (ver figura 16) (Gómez et al, 2023). A esfalerite (sulfeto de zinco) representa a fonte mineral mais importante para os minérios de índio, e contém apenas cerca de 10 a 20 mg de índio por kg de matéria-prima (Moreno et al, 2021). Também se encontra o índio frequentemente em depósitos de cobre, chumbo e estanho e, em menor grau, no bismuto, cádmio, prata e outros minérios polimetálicos menores; no entanto, na maioria destes minerais, o índio ocorre normalmente em concentrações subeconômicas (Gómez et al, 2023). Menos de 5% da produção global de índio é obtida a partir dos resíduos dos processos de refinação de cobre e estanho (Gómez et al, 2023).

4.5.2 O índio na transição energética

O índio emergiu como um metal estratégico para indústrias de alta tecnologia e renováveis, sendo catalogado como um material crítico para promover um futuro mais verde. No entanto, a sua disponibilidade, produção, reservas, preços e aplicabilidade, expõem a real criticidade desse material e problemas que o mesmo pode enfrentar no novo cenário energético.

A importância econômica do índio tem aumentado significativamente nos últimos anos com base no seu reconhecimento como elemento estratégico no desenvolvimento de tecnologias emergentes e de “energias limpas”. A produção do índio cresceu drasticamente nas últimas décadas como pode ser verificado na figura 29, passando de uma produção global de 30 t nos anos 70 para 990 t em 2023, o que representa uma taxa de crescimento de 3200% nos últimos 53 anos.

Com base na projeção futura da produção do índio, observamos na figura 29 que é possível atingir uma produção global de até 1 780 toneladas métricas até 2050. Isso representa um aumento previsto de mais de 1000% em comparação com os níveis de produção de 1990. Vale salientar que essa estimativa poderá ser validada se a produção e procura por esse material continuar a crescer de forma linear e no mesmo ritmo observado atualmente.

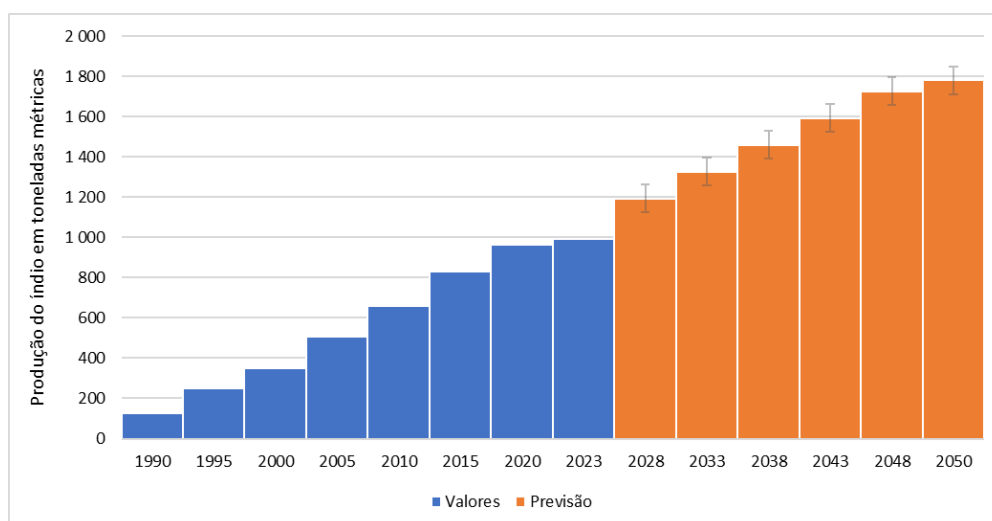


Figura 29-Histórico da produção do Índio desde 1990, e respectiva projeção futura. Dados obtidos em fontes (Candelisea et al, 2011) e (USGS, 2024).

Atualmente a China tem liderado a produção primária do índio desde 2000, representando 57% da sua produção global em 2021, seguida pela Coreia do Sul, Canadá e Japão com 22%, 7% e 6%, respectivamente (Gómez et al, 2023). Estes cinco países representam mais de 90% do total da produção primária de índio. Atualmente, estão em curso vários projetos de exploração ou desenvolvimento do índio no Canadá, na América do Sul e nos EUA (Gómez et al, 2023).

A Austrália tem as maiores reservas de índio associadas às suas reservas de zinco e chumbo; no entanto, o índio raramente é recuperado diretamente da exploração mineira como dito anteriormente.

Uma estimativa realizada pela Universidade das Nações Unidas (UNU) em 2015, destaca que as reservas globais neste ano foram de 6 240 toneladas, havendo uma taxa de crescimento de 312% em relação as reservas estimadas para 2023 de 25 693 toneladas (Gómez et al, 2023).

Com base no valor das reservas atuais, se utilizarmos como referência o consumo relativo a 2023 (990 t), podemos calcular que as reservas dariam para apenas mais 25 anos. Vale ressaltar que as reservas mudam ao longo do tempo. À medida que a exploração mineira esgota as reservas, estas são encerradas. Um exemplo claro é o encerramento da mina de Toyaha, situada na prefeitura de Hokkaido, no Japão, que foi em tempos o maior produtor mundial de índio, mas que foi encerrada por esgotamento das reservas de minério em 2006 (Gómez et al, 2023). Estas medidas incentivam as empresas mineiras a encontrar e desenvolver reservas adicionais para satisfazer a procura de índio e ajustar as reservas ao longo do tempo.

Em meados e no final da década de 1980, o desenvolvimento de semicondutores de fosfeto de índio e filmes finos de óxido de índio e estanho para utilização em *liquid-crystal display (LCD)* despertou muito interesse. Em 1992, a aplicação de filmes finos tornou-se o maior uso final. A quantidade de índio consumida é em grande parte uma função da produção mundial de LCD.

O óxido de índio e estanho (*indium tin oxide - ITO*) também é amplamente utilizado na fabricação de smartphones, computadores portáteis, telemóveis, relógios, painéis solares, painéis luminosos, máquinas eletrônicas de vendas, caixas multibanco, janelas inteligentes, para-brisas de automóveis e aviões, detetores de gases, sensores de anticorpos e de ADN, eletrocatalisadores, entre outros (Monteiro et al, 2019). O índio, na forma de $\text{SnO}_2\text{-In}_2\text{O}_3$, também é utilizado como estabilizador anódico. É também utilizado em veículos ligeiros, especificamente em componentes eletrônicos. Um veículo pode conter até 0,4 g de índio que não é recuperado durante o processo de reciclagem do veículo (Calvo et al, 2022).

Os ecrãs planos e os ecrãs tácteis representam 65% da procura em 2022 (Sverdrup et al, 2024). Os painéis fotovoltaicos de seleneto cobre-índio-gálio (CIGS) têm uma eficiência de 22-25% e deverão impulsionar significativamente a procura futura de índio, gálio e selénio. Este tipo de painel solar detém 12% do mercado em 2023, prevendo-se um aumento significativo (Sverdrup et al, 2024). Atualmente, a tecnologia CIGS requer aproximadamente 23 kg de índio/MW (Calvo et al, 2022). Por conseguinte, o aumento da implementação de painéis solares CIGS para dezenas ou centenas de gigawatts por ano exigiria um aumento considerável da produção de índio em relação aos níveis atuais (Lokanc et al, 2015).

A necessidade crescente de índio nas tecnologias fotovoltaicas deverá exceder a oferta disponível. As estimativas atuais sugerem que apenas 25% da procura global de células solares de índio pode ser satisfeita, o que representa um desafio significativo para a transição energética (Sverdrup et al, 2024). As projeções indicam que a produção de índio atingirá o seu pico entre 2025 e 2030, enquanto o pico dos painéis solares fotovoltaicos devido à escassez de índio está previsto para cerca de 2090. Assim, o crescimento da capacidade fotovoltaica pode ficar aquém da procura real (Sverdrup et al, 2024).

A pergunta que se pode fazer é: então, o que torna o índio um material crítico?

Podemos classificar o índio como um elemento crítico, devido a sua baixa disponibilidade (Kashyap et al, 2022) além de ser um mineral predominantemente extraído como um subproduto na extração dos metais base cobre, zinco e chumbo. Por conseguinte, a disponibilidade do índio está intrinsecamente ligada à extração e refinação destes metais de base. Qualquer perturbação nestas cadeias de abastecimento tem um impacto direto na produção de índio, colocando desafios significativos às indústrias que dependem da sua utilização (Elshkaki et al, 2015). Desta forma, as oscilações no mercado dos metais primários podem influenciar diretamente no preço dos mesmos, essa inconstância pode ser observada na figura 30.

Além disso, os preços do índio também são afetados por uma variedade de considerações económicas, sociais e políticas internacionais imprevisíveis, como a crise económica global entre 2008-2009. O pico observado no final da década de 1970 e início da década de 1980, foi devido à construção de reatores nucleares. Entre 1990 e 1995, o preço do índio registou uma queda significativa devido à sua inclusão no plano de aquisições do

National Defense Stockpile (NDS) nos Estados Unidos em 1989. Devido a uma oferta restrita e a uma forte procura, os preços atingiram um pico de 388 \$/kg em 1995. A partir de 1995, o preço do índio registou uma descida contínua até atingir 97 \$/kg em 2002. A descida do preço do índio durante este período deve-se a vários fatores: excesso de oferta da produção na China, competitividade dos custos da reciclagem do índio, redução da procura de produção de LCD e mudança para tecnologias de membrana mais eficientes. Os preços do índio começaram a subir novamente, atingindo um pico de 946 \$/kg em 2005, durante o período de estudo. Este aumento está associado a múltiplos fatores, mas principalmente devido ao encerramento de uma instalação de produção primária em França devido a um incêndio em novembro de 2015, que danificou a fábrica.

Cumpra também ressaltar o fato que devido ao mau desempenho ambiental das fundições, a China encerrou outras minas, reduzindo a produção de índio e, conseqüentemente, aumentando o seu preço. Os preços do índio diminuíram entre 2005 e 2009 devido a um aumento significativo da capacidade de produção secundária e da produção no Japão e à crise económica mundial de 2008-2009. A sua recuperação após a crise económica também levou a flutuações nos preços do índio nos anos seguintes (2010-2014). Devido a um excesso de oferta, a uma maior eficiência na pulverização catódica (*Sputtering*)²² do ITO (utilizada sobretudo em painéis LCD) e à reciclagem no processo de pulverização catódica, os preços voltaram a baixar e, a partir de 2016, registou-se um aumento ligeiro e constante do preço do índio. A pandemia de Covid-19, que afetou gravemente a economia mundial, ainda não teve um impacto significativo nos preços do índio, mas é provável que as repercussões se façam sentir nos próximos anos. Com base nos valores históricos, é possível prever que o preço do índio continuará a aumentar nos próximos 6 anos, chegando a custar 318 \$/kg.

Além disso, estima-se que a procura de índio aumente 15%, enquanto a produção de zinco deverá aumentar apenas 1-3%, pelo que se espera que o seu preço continue a aumentar, (Gómez et al, 2023).

²² Sputtering é uma espécie de revestimento seco. Um alvo do material formador de filme fino (deposição) e um substrato como ânodo são colocados em uma câmara cheia de gás inerte (gás Ar, etc.). Uma alta tensão é aplicada entre eles. Essa alta tensão gera plasma e no plasma, o Ar⁺ colide com o alvo em alta velocidade. As partículas alvo que foram pulverizadas aderem ao substrato, levando à formação do filme (KGS, 2024). O objetivo do revestimento ITO é criar um revestimento condutor transparente para vários dispositivos e aplicações eletrônicas, como também em células solares (Kintek, 2024).

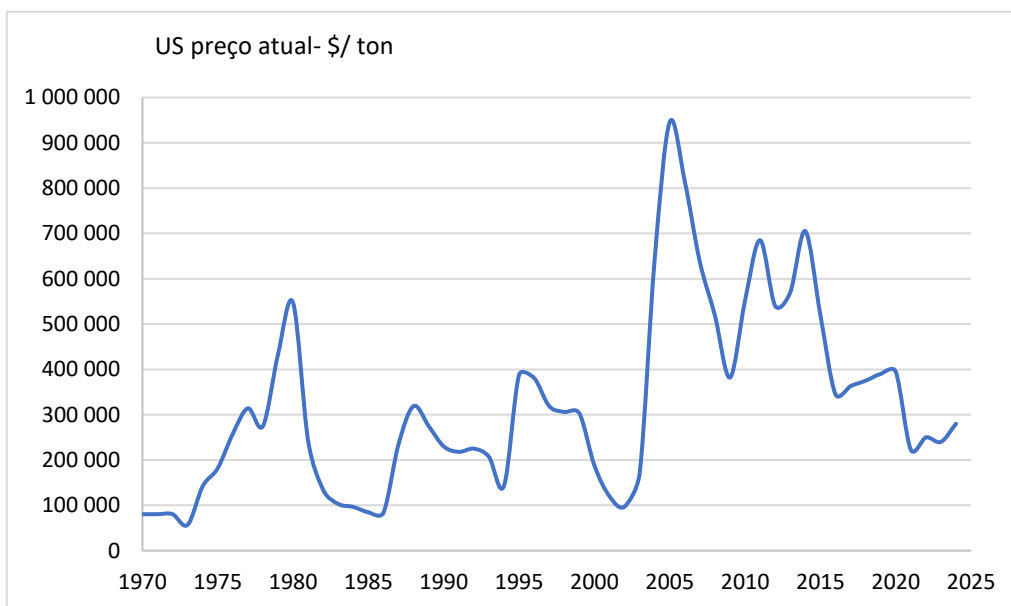


Figura 30-Comportamento do preço do índio nos últimos anos (1970 -2024). Fonte: USGS, 2023.

Dado que o índio é um recurso escasso e valioso, a reciclagem e recuperação deste mineral tornaram-se cada vez mais importante no contexto da sustentabilidade e da economia circular. Reduzindo a dependência da mineração e da extração de novos recursos e consequentemente minimizando os impactos ambientais associados à extração.

4.6 Terras Raras

A descoberta das terras raras remonta ao final do século XVIII e início do século XIX na Suécia (Dushyantha et al, 2020). Como podemos ver na figura 31, os elementos terras raras (doravante denominados REEs) são um grupo de 17 elementos químicos, incluindo 15 lantanídeos (lantânio, cério, praseodímio, neodímio, promécio, samário, európio, gadolínio, térbio, disprósio, hólmio, érbio, túlio, itérbio, lutécio) e escândio e ítrio (Depraite et al, 2023). O escândio e o ítrio não pertencem à família dos lantanídeos, mas são considerados terras raras porque tendem a ocorrer nos mesmos depósitos de minério, além de apresentarem propriedades químicas semelhantes às dos lantanídeos e são, por isso, incluídos nas discussões sobre as REEs (IRENA, 2022).

O termo terras raras é, de fato, um termo impróprio, pois não se trata de materiais raros ou escassos. Em vez disso, são relativamente abundantes na crosta terrestre - por exemplo, o cério é o 25º elemento mais abundante, mais do que o cobre. Túlio e o lutécio, os dois elementos de terras raras menos abundantes, têm cada um uma abundância na crosta quase 200 vezes superior à do ouro ou da platina. A designação como terras raras deriva do fato de que esses materiais, na prática, são encontrados dispersos em impurezas residuais, portanto, para obter esses metais com grau de pureza utilizável, é necessário processar grandes quantidades de minério com concentrações suficientemente elevadas para justificar a extração econômica. Isso significa que a viabilidade econômica da mineração de terras raras muitas vezes depende não apenas da disponibilidade do elemento em si, mas também da tecnologia disponível para o seu processamento.

Tabela Periódica dos Elementos

1 IA 1A	2 IIA 2A											13 IIIA 3A	14 IVA 4A	15 VA 5A	16 VIA 6A	17 VIIA 7A	18 VIIIA 8A
1 H Hydrogen 1.008																	2 He Helium 4.003
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012											5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.011	7 N Nitrogen 14.007	8 O Oxygen 15.999	9 F Fluorine 18.998	10 Ne Neon 20.180
11 Na Sodium 22.990	12 Mg Magnesium 24.305	3 IIIB 3B	4 IVB 4B	5 VB 5B	6 VIB 6B	7 VIIB 7B	8 VIII 8	9 VIII 8	10 VIII 8	11 IB 1B	12 IIB 2B	13 Al Aluminum 26.982	14 Si Silicon 28.086	15 P Phosphorus 30.974	16 S Sulfur 32.066	17 Cl Chlorine 35.453	18 Ar Argon 39.948
19 K Potassium 39.098	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.956	22 Ti Titanium 47.867	23 V Vanadium 50.942	24 Cr Chromium 51.996	25 Mn Manganese 54.938	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933	28 Ni Nickel 58.933	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.38	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.631	33 As Arsenic 74.922	34 Se Selenium 78.971	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 84.798
37 Rb Rubidium 84.468	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.906	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.906	42 Mo Molybdenum 95.95	43 Tc Technetium 98.907	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.906	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.868	48 Cd Cadmium 112.414	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.710	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.5	53 I Iodine 126.905	54 Xe Xenon 131.294
55 Cs Cesium 132.905	56 Ba Barium 137.328	57-71 ETR Série dos Lantanídeos	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.948	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.222	78 Pt Platinum 195.085	79 Au Gold 196.967	80 Hg Mercury 200.592	81 Tl Thallium 204.383	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.980	84 Po Polonium [209]	85 At Astatine [209]	86 Rn Radon [222]
87 Fr Francium 223.020	88 Ra Radium 226.025	89-103 Série dos Actinídeos	104 Rf Rutherfordium [261]	105 Db Dubnium [262]	106 Sg Seaborgium [266]	107 Bh Bohrium [264]	108 Hs Hassium [265]	109 Mt Meitnerium [268]	110 Ds Darmstadtium [269]	111 Rg Roentgenium [272]	112 Cn Copernicium [277]	113 Nh Nihonium [278]	114 Fl Flerovium [285]	115 Uup Ununpentium [285]	116 Lv Livermorium [293]	117 Uus Ununseptium [293]	118 Uuo Ununoctium [294]
		57 La Lanthanum 138.905	58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodymium 140.908	60 Nd Neodymium 144.242	61 Pm Promethium [145]	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.925	66 Dy Dysprosium 162.500	67 Ho Holmium 164.930	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.934	70 Yb Ytterbium 173.055	71 Lu Lutetium 174.967	
		89 Ac Actinium 227.028	90 Th Thorium 232.038	91 Pa Protactinium 231.036	92 U Uranium 238.029	93 Np Neptunium 237.048	94 Pu Plutonium 244.064	95 Am Americium 243.061	96 Cm Curium 247.070	97 Bk Berkelium 247.070	98 Cf Californium 251.080	99 Es Einsteinium [254]	100 Fm Fermium 257.095	101 Md Mendelevium 258.1	102 No Nobelium 259.101	103 Lr Lawrencium [262]	

Figura 31-Tabela periódica com destaque aos elementos terras raras (Silva, 2018)

Os recursos mundiais estão contidos principalmente na bastnasite (minerais de carbonato-fluoreto) e nas areias de monazite (mineral de fosfato). Os primeiros, com depósitos principais na China e nos Estados Unidos, constituem a maior percentagem dos recursos económicos de terras raras, enquanto os depósitos de monazite na Austrália, Brasil, China, Índia, Malásia, África do Sul, Myanmar, Tailândia e Estados Unidos constituem o segundo maior segmento. Além disso, a loparite (um mineral de perovskite) tem sido explorada na Rússia (península de Kola) como uma importante fonte de cério e de alguns lantanídeos. Atualmente, existem 178 depósitos amplamente distribuídos pela Terra (Zhou et al., 2017).

Os REEs são frequentemente classificados em dois subgrupos: terras raras leves (lantânio (La), cério (Ce), praseodímio (Pr), neodímio (Nd), promécio (Pm), gadolínio (Gd), európio (Eu), e o samário (Sm)), e terras raras pesadas (disprósio (Dy), ítrio (Y), térbio (Tb), hólmio (Ho), érbio (Er), túlio (Tm), itérbio (Yb) e o lutécio (Lu)) (Lisa Depraite, 2023). Esta classificação baseia-se no número atómico, massa atómica e nas propriedades de cada elemento. Os elementos de terras raras leves (LREE) têm números atómicos mais baixos e massas atómicas relativamente mais baixas do que os elementos de terras raras pesados (HREE) (Dushyantha et al, 2020).

Os metais de terras raras mais abundantes são o cério, o ítrio, o lantânio e o neodímio, com uma abundância média muito semelhante à de outros metais industriais comumente explorados, como o níquel, o crómio ou o zinco. Mas, como já foi referido, raramente são encontrados em concentrações economicamente extraíveis. Além disso, as areias monazíticas são radioativas devido à presença de tório e, em alguns depósitos, também de urânio.

Os REEs são frequentemente encontrados em conjunto e, por esta razão, não existe um mercado único de elementos individuais de terras raras, sendo que a maioria das estatísticas sobre a sua produção considera todos eles em conjunto, sendo muito difícil encontrar dados fiáveis para os metais de forma individual.

Podemos observar na figura 32 o histórico da produção global de terras raras e respetiva projeção futura. É de se notar que esta projeção segue um crescimento linear no decorrer do tempo, podendo haver uma taxa de crescimento superior a 700% em 2050 em relação a 2015. Essa tendência poderá de fato acontecer se a procura por tecnologias de diversos setores, sobretudo, as energias “limpas” continuarem a crescer como ritmo atual.

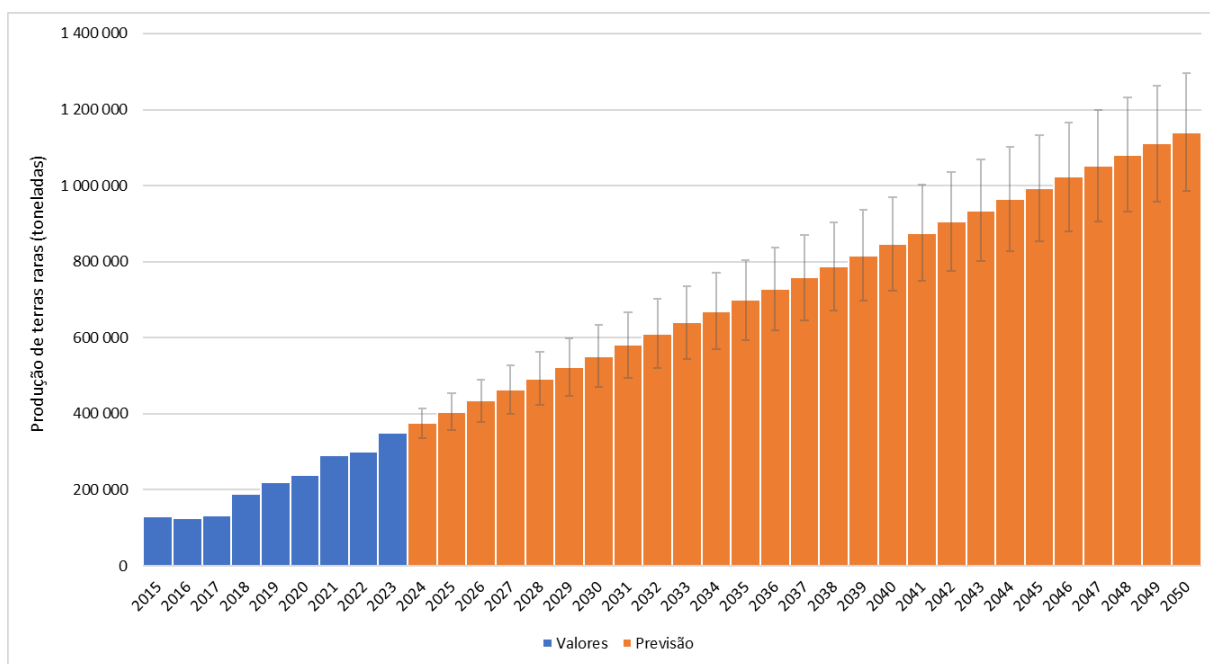


Figura 32-Produção mundial de terras raras desde 2015. Fonte: (Jaganmohan, 2024) e (USGS, 2023).

Como pode-se verificar, estamos atualmente a presenciar um crescimento significativo da produção de REEs, cerca de 169% nos últimos nove anos (2015-2023). As reservas mundiais estimadas, com base na exploração atual das minas conhecidas, são cerca de 130 milhões de toneladas métricas (USGS, 2023), o que significa que, se a procura continuar a crescer a este ritmo de 169% por ano e não for desenvolvido nenhum método de reciclagem eficiente dos metais de terras raras produzidos, as reservas mundiais conhecidas poderão estar esgotadas em 2060. Esta estimativa suscita alguma preocupação quanto à capacidade de produção futura, o que explica o fato de as terras raras estarem agora incluídas na lista de materiais críticos. Outros autores apresentaram prognósticos mais otimistas baseados numa estimativa mais ampla dos recursos globais (tendo em conta alguns minérios existentes ainda não explorados) de cerca de 478 milhões de toneladas e afirmam que estes recursos são suficientes para satisfazer a procura global nos próximos cem anos (Zhou et al., 2017).

Neste ponto, é fundamental referir alguns pormenores sobre o desenrolar histórico do consumo/produção de metais de terras raras. A procura destes materiais começou a crescer significativamente em meados dos anos 60, quando os primeiros televisores a cores entraram no mercado. O európio era o material essencial para a produção de imagens a cores. Nessa altura, a mina de Mountain Pass (Califórnia, EUA) começou a produzir európio a partir de bastnasite, que continha cerca de 0,1% do metal, o que fez desta mina o maior produtor de terras raras do mundo e colocou os Estados Unidos na liderança da produção. A China só começou a produzir metais de terras raras nos anos 80 e no início dos anos 90 tornou-se o maior produtor mundial.

Ao longo da década de 1990 e no início da década de 2000, a China reforçou regularmente o seu controlo sobre o mercado mundial de metais e óxidos de terras raras e começou a vender terras raras a preços tão baixos que, em 2002, a mina de Mountain Pass, incapaz de competir, parou de funcionar, logo seguida por muitas outras em todo o mundo. O domínio chinês atingiu o seu auge em 2010, quando controlava cerca de 95% da produção mundial, e os preços subiram mais de 500% em apenas alguns anos. A consequência foi um despertar do consumo de terras raras, que, por outro lado, permitiu às empresas mineiras de todo o mundo reavaliar as suas perspetivas e explorar novas. Em decorrência a essa forte sujeição a China, em 2012 a mina de Mountain Pass voltou a funcionar, assim como as minas da Austrália.

É possível observar na figura 33 a parcela em termos percentuais referente aos países produtores dos REEs. A produção global com cerca de 350 mil toneladas é dominada pela China, com uma parcela de 70%, seguida dos EUA (14%) e da Austrália (4%). Outros produtores importantes são Myanmar, Tailândia, Vietname, Índia e Rússia (USGS, 2024).

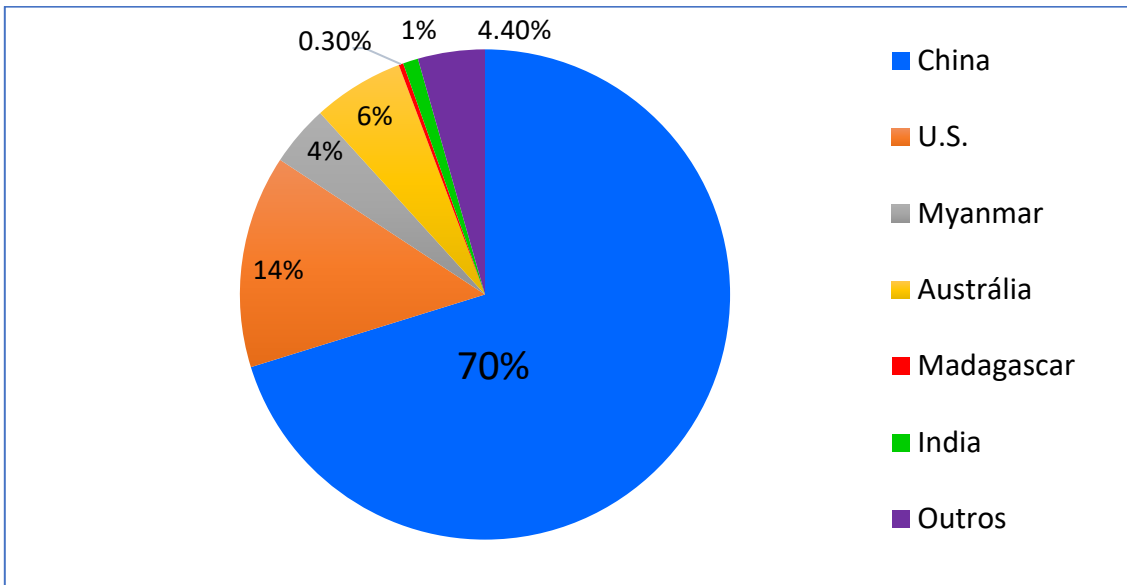


Figura 33- Percentagem de produção de terras raras por país em 2023 (USGS, 2024).

Em 2023, o cério representou a maior partição volumétrica, seguido pelo lantânio, neodímio e outros (GlobalDate, 2023). A figura 34 apresenta a percentagem das terras raras mais produzidas de acordo com (Techcet, 2020). Porém, o neodímio é atualmente o metal com o maior número de utilizações, principalmente no domínio dos ímanes permanentes, utilizados intensivamente em aplicações de eco-energia como os automóveis eléctricos e as turbinas eólicas, bem como em todos os tipos de altifalantes que encontramos nos telemóveis e computadores portáteis. Prevê-se que o neodímio lidere o mercado global em 2026.

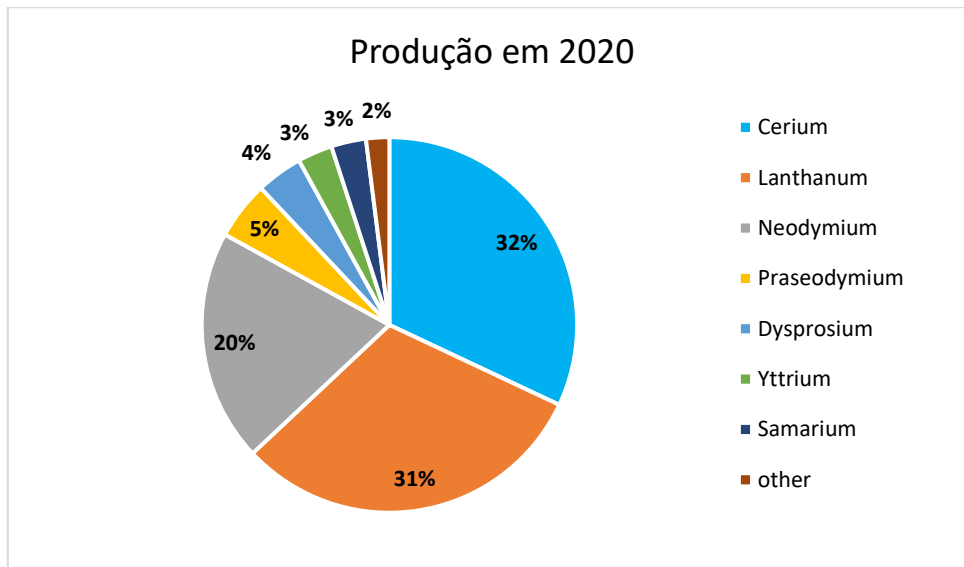


Figura 34-Percentagem das terras raras mais produzidas em 2020 (Techcet, 2020).

4.6.1 Aplicabilidade das terras raras

Podemos observar que estes materiais desempenham um papel crucial na configuração das tecnologias modernas. Cada material possui suas próprias funcionalidades, aplicações e características distintas. Os REE por sua vez, têm ganhado crescente destaque e visibilidade ao longo dos anos devido às suas notáveis propriedades físicas e químicas. Estes elementos, por sua vez, estão presentes em uma ampla gama de setores industriais, como pode-se observar na figura 35. A tabela 11 enfatiza as principais aplicações, funcionalidades, e uso industrial dos diferentes materiais, incluindo os elementos terras raras.

Tabela 11-Exemplos de uso, aplicação e funcionalidade de alguns materiais críticos (Silva, 2018)

Uso industrial	Aplicação	Funcionalidades	Materiais Críticos
Motores elétricos em veículos convencionais e avançados	Ímãs permanentes de Elementos Terras Raras (REE)	Redução do consumo de combustível pela diminuição do peso do veículo	Nd, Pr, Dy, Tb
Geração de energia eólica, hidrelétrica e fotovoltaica	Ímãs permanentes de REE, células fotovoltaicas	Maior confiabilidade, eficiência e desempenho energético	Nd, Pr, Dy, Tb, Si, Cu, Cd, Se, In, Ag, Te
Lâmpadas fluorescentes compactas e lineares, LEDs etc.	Fósforos	Redução de 70% no consumo de energia, mantendo características de cor e luminescência	Y, Eu, Tb
Baterias de veículos elétricos	Armazenamento de energia	Maior capacidade energética, potência, vida útil e autonomia	Si, Ti, Nb, Co, Li, Mn, Ni, Cu
Capacitores de elevada densidade de energia	Capacitores cerâmicos, de tântalo e de outros tipos dopados com REE	Alta densidade energética em comparação com capacitores convencionais	La, Ce, Pr, Nd, Y, Eu, Gd, Lu, Dy
Sistema integrado automático de partida	Ímãs permanentes de REE	Redução do consumo de combustível	Nd, Pr, Dy, Tb
Unidades de discos rígidos para computadores	Ímãs permanentes de REE	Redução do tamanho de motores elétricos, que se tornam mais compactos, leves e potentes	Nd, Pr, Dy, Tb,
Dispositivos pessoais móveis sem fio	Ímãs permanentes de REE	Miniaturização dos displays para uso em telas planas	Nd, Pr, Dy, Tb, Y, Eu, Gd, Ce
Fibras óticas	Amplificação de sinal	Ganhos na amplificação do sinal resultante da mistura química de REE à sílica, matéria-prima das fibras óticas	Y, Eu, Tb, Er

Materiais críticos para a transição energética: análise global e implicações ambientais
Mestrado de Engenharia de Materiais

Telas planas de TV e displays	Fósforos de REE (excitados por UV em baixa pressão)	Propicia cores brilhantes em grandes telas planas	Y, Eu, Tb, Gd, Pr, Ce
Unidade de craqueamento catalítico em leito fluidizado	Catalisadores utilizados no refino de petróleo	Propiciam sítios ácidos para a matriz catalítica	La, Ce
Diagnóstico por imagem (MRI), imagem por raios X	Ímãs permanentes e mudanças no comprimento de onda	Geração de campo magnético e captura de luz por cintilação	Nd, Pr, Dy, Tb, Y, Eu
Produção de lâmpadas de vapor de mercúrio, ligas metálicas; indústria aeroespacial e nuclear e esportiva (por exemplo, fabricação de bastões de baseball)	Iluminação e supercondutores; a adição do metal alumínio aumenta o ponto de fusão, com aplicação nas indústrias aeroespacial e aeronáutica	Produção de lâmpadas de vapor de mercúrio, como óxido de escândio (Sc_2O_3), obtendo-se luz artificial de mais alta qualidade; o iodeto de escândio (ScI_3) gera fonte de luz parecida com a luz solar	Sc
Fonte de radiações beta para produzir medidores de espessuras muito finas; pode ser usado na fabricação de baterias muito pequenas que convertam a luz em corrente elétrica (por meio de fotocélulas)	Pode ser usada para produzir baterias muito pequenas que convertam a luz em corrente elétrica; também pode ser fonte de radiações beta para produzir medidores de espessuras muito finas	A radiação beta, ao incidir sobre o fósforo, gera luz. Seus sais luminescentes podem ser usados para a produção de ponteiros e mostradores de relógio	Pm

Como podemos observar, os minerais “críticos” estão presentes em todas as ‘novas tecnologias’ que vemos a nossa volta, sejam pequenos equipamentos digitais, como para a produção de automóveis, turbinas eólicas, painéis solares, estruturas de aeronaves, sistemas de comunicação, uso militar, laboratorial e médico. Os números em encarnado na figura 35 destacam os tipos de materiais que são necessários para a fabricação em cada tecnologia.

Materiais críticos para a transição energética: análise global e implicações ambientais
Mestrado de Engenharia de Materiais

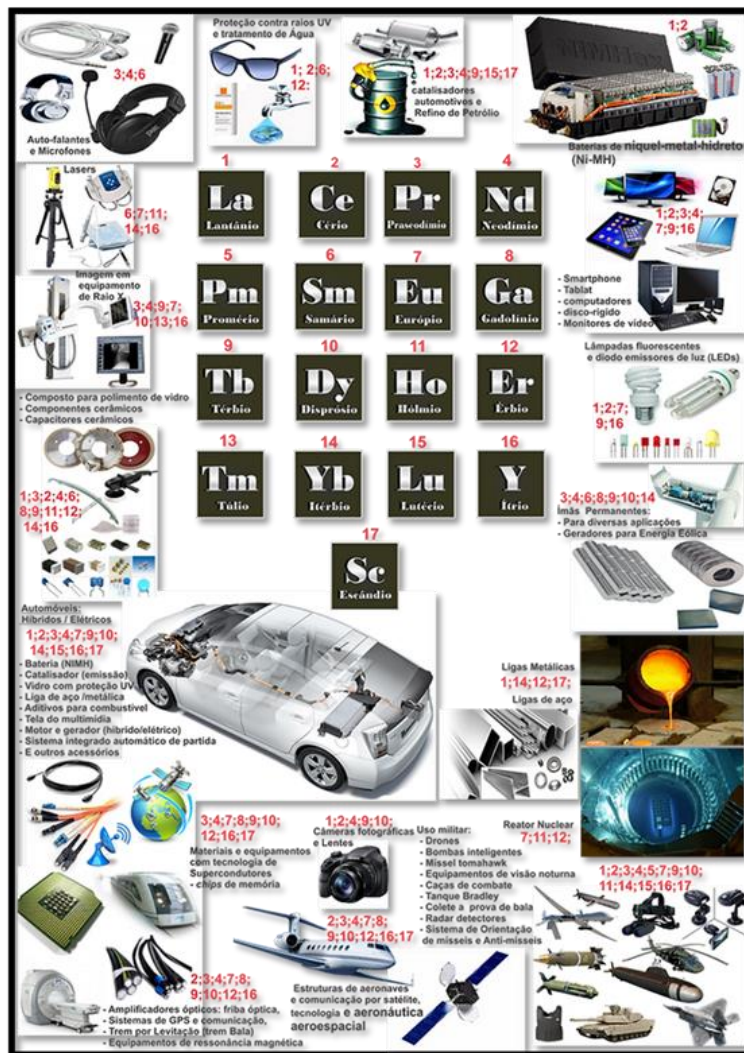


Figura 35-Principais aplicações de materiais críticos (Silva, 2018)

A tabela 12 apresenta um panorama dos preços correntes de alguns elementos importantes de terras raras.

Tabela 12-Alguns metais importantes de terras raras e os preços dos respectivos óxidos (Statista 2023).

Elementos Terras Raras	Preço (US\$/kg)
Neodímio	55
Disprósio	323
Térbio	1300
Európio	27
Lantânio	1,65
Cério	1,65
Érbio	16
Ítrio	2,94
Samário	1,75
Lutécio	768
Praseodímio	62
Escândio	677

Como se pode verificar, os preços das terras raras são muito diferentes e dependem de vários parâmetros, como a procura, a escassez, a dificuldade de processamento e a origem. Estes preços, após o pico provocado pela China em 2011, têm-se mantido razoavelmente estáveis, como se pode ver na figura 36 para os casos do disprósio e do neodímio. Apesar do ainda domínio da China no mercado e da sua restrição à exportação destes materiais, a entrada "em força" na concorrência de outros produtores nos EUA, Austrália, Tailândia, Rússia e Brasil trouxe alguma estabilidade ao mercado.

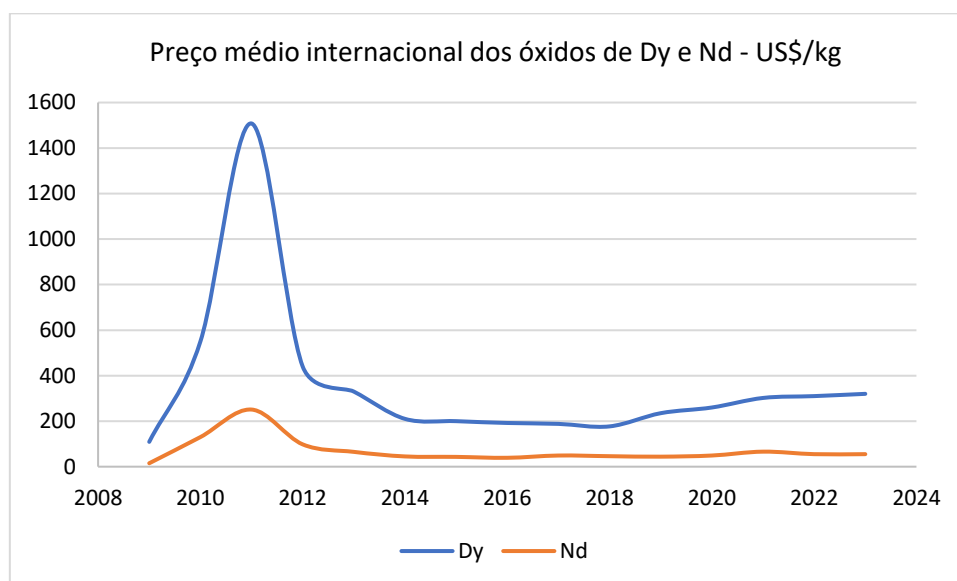


Figura 36-Comportamento dos preços dos óxidos do disprósio e neodímio entre o período de 2009 a 2023 (Statista, 2023).

4.6.2 As terras raras na transição energética

Certamente, o mercado de terras raras enfrentará um crescimento contínuo nos próximos anos, prevendo-se uma procura significativa de neodímio e disprósio que muito provavelmente não será satisfeita pela produção. Podemos também verificar na figura 35 que o Dy e o Nd são utilizados em diversos setores, desde dispositivos eletrónicos, como para ímãs permanentes em turbinas eólicas, capacitores, painéis solares, motores de carros elétricos e híbridos, conversores catalíticos, máquinas de ressonância magnética, reatores nucleares, lasers e fibras óticas.

Por outro lado, com o crescimento do mercado de *Light Emitting Diodes (LED)*, as *Compact Fluorescent Lamps (CFL)* e as *Linear Fluorescent Lamp (LFL)* irão perder mercado na próxima década, e desta forma a procura de óxidos de európio, térbio e ítrio irá diminuir no mercado da iluminação.

Diante deste cenário, podemos concluir que o Nd e o Dy serão os minerais críticos mais procurados, sobretudo devido ao aumento exponencial das novas tecnologias renováveis e mobilidade elétrica.

Capítulo 5

Reciclagem

A reciclagem dos minerais críticos emergiu como um aspeto fundamental na gestão sustentável dos recursos, alinhando-se com o objetivo global para mitigar a degradação ambiental, reduzir a dependência de recursos finitos e promover uma economia circular. Este processo abrangente envolve a recuperação e a valorização dos materiais críticos, que são essenciais para várias aplicações de alta tecnologia, desde a eletrónica e os sistemas de energias renováveis até às tecnologias aeroespaciais e de defesa. Dado que a procura por estes minerais continua a aumentar devido aos rápidos avanços tecnológicos e ao crescimento populacional, a reciclagem apresenta uma solução viável para aliviar as restrições de fornecimento, minimizar os impactos ambientais associados à extração e reduzir as tensões geopolíticas decorrentes da escassez de recursos.

A reciclagem destes minerais envolve uma abordagem diversificada que engloba técnicas de recolha, triagem, processamento e purificação adaptadas às propriedades específicas de cada mineral. Este processo complexo é muitas vezes difícil devido a fatores como a complexidade do produto, a heterogeneidade do material e a presença de contaminantes. No entanto, os avanços nas tecnologias de reciclagem, juntamente com estratégias inovadoras e quadros regulamentares, facilitaram um progresso significativo na superação destes obstáculos e na promoção da adoção generalizada de práticas de reciclagem em várias indústrias.

A (IEA, 2021) estima que, até 2040, o cobre, lítio, níquel e o cobalto reciclados a partir de baterias usadas poderão satisfazer 10% da procura destes minerais. Assim como o (World Wildlife Fund, 2022) afirma que a reciclagem poderia potencialmente fornecer 20% da procura total de minerais entre 2022 e 2050.

Um número crescente de estudos destaca a forma como a procura futura de minerais críticos pode ser significativamente reduzida (figura 37) através da transição para uma economia circular²³ (Gorman et al, 2022). Em conjunto, as estratégias da economia

²³ Nosso modelo económico atual funciona principalmente no sentido de produzir, utilizar e descartar. Em contraste com isto, a ideia de uma economia circular é uma mudança sistémica em direção a processos de produção regenerativos e restauradores que visam a partilha, reparação, renovação e a reciclagem. O objetivo é minimizar a utilização de recursos, a criação de resíduos, bem como a poluição e as emissões de carbono, através da criação de um sistema de circuito fechado (Parlamento Europeu, 2023).

circular, as novas tecnologias e a reciclagem poderiam reduzir a procura cumulativa de minerais em 58% entre 2022 e 2050, em comparação com um cenário de manutenção do status quo (*business as usual scenario*²⁴), com o cobalto, o níquel e o manganês reciclados a suprir potencialmente 80-90% da procura (EJF, 2023).

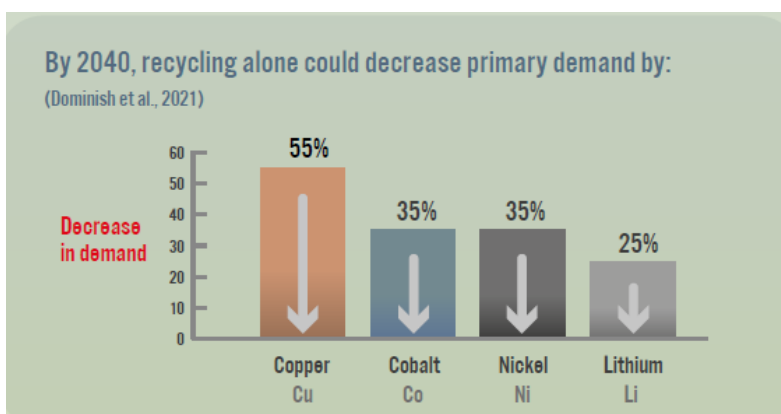


Figura 37-Redução da procura primária por minerais críticos (EJF, 2023).

O mineral primário é considerado como material recentemente extraído, enquanto o mineral secundário é considerado como material reciclado. Existem duas taxas de reciclagem habitualmente referidas: (1) fim de vida (End of life- EOL), refere-se à percentagem de um material ou produto que é reciclado ou reutilizado quando atinge o fim de vida útil; e (2) conteúdo reciclado (RC), indica à proporção de materiais reciclados utilizados na produção de novos produtos ou materiais. Esta métrica é indicativa da extensão com que os materiais secundários (aqueles recuperados dos resíduos) são utilizados nos processos de produção.

A (EJF, 2023) também defende que as estratégias da economia circular poderiam reduzir as emissões globais de gases com efeito estufa em 39% (22,8 mil milhões de toneladas) até 2030.

²⁴ O termo cenário "*business as usual*" refere-se normalmente a um conjunto de pressupostos padrão ou de base sobre tendências futuras, frequentemente utilizado em vários contextos de planeamento e análise, especialmente em domínios como a economia e as alterações climáticas (Institute, 2017).

As capacidades de reciclagem devem ser aumentadas rapidamente, para fazer face ao aumento das tecnologias hipocarbónicas que atingirão o fim da vida útil (EOL) durante a próxima década. Com a reciclagem frequentemente associada a custos líquidos, há uma necessidade urgente de implementação de políticas e quadros regulamentares para encorajar taxas de reciclagem mais elevadas. Entre outras, estes devem estabelecer responsabilidades e metas claras para a reciclagem e utilização dos materiais reciclados, e prever melhores infraestruturas de recolha, triagem e separação. Paralelamente à reciclagem, devem também ser adotadas estratégias por parte dos políticos e métodos adicionais para a redução da procura por novos materiais. Uma vez que o objetivo é manter os minerais extraídos em utilização durante mais tempo, pode ser adotados alguns métodos que podem ajudar a minimizar os impactos ambientais, sociais e económicos, tais como: (i) melhor planeamento urbano para aumentar o tempo de vida dos veículos em utilização; (ii) investimento em transportes públicos para reduzir as deslocações individuais de automóveis; (iii) fornecimento aos consumidores da informação e das peças sobressalentes de que necessitam para reparar os seus dispositivos eletrónicos; (iv) introdução de normas mínimas de durabilidade e reparabilidade, incluindo o direito à reparação, e (v) introdução de incentivos para que as empresas renunciem à obsolescência programada e ofereçam opções de "aluguer" ou "pagamento por utilização".

De acordo com (EJF, 2023), prolongar a vida útil dos produtos pode ajudar a mitigar a pressão do fornecimento – um aumento para o dobro na vida útil das baterias poderia reduzir quase para metade a procura de cobalto até 2050 (EJF, 2023).

Nos próximos subcapítulos são descritos em detalhes os aspetos e processos principais para a reciclagem dos principais metais críticos abordados neste trabalho.

5.1 Reciclagem do Cobalto

Como visto no capítulo anterior, o cobalto é um material crítico importante e constituinte de uma ampla gama de produtos, como baterias, dispositivos eletrónicos e superligas. A elevada taxa de crescimento anual da procura mundial do cobalto (cerca de 6-11%) e a elevada volatilidade dos preços, bem como a dependência de um país fornecedor quase único, a República Democrática do Congo, que fornece cerca de 60% do cobalto produzido globalmente, causa preocupações razoáveis em relação à oferta e procura desse mineral (Golroudbary et al, 2022).

Para resolver estas questões, uma das soluções possíveis é promover o fecho do ciclo do fluxo de materiais através da reciclagem de produtos em fim de vida que contenham cobalto. Assim, as medidas políticas adotadas no âmbito da economia circular (aumento das taxas de reciclagem e redução dos resíduos de matérias-primas críticas) devem atenuar não só os potenciais riscos futuros de abastecimento destes materiais, mas também o impacto ambiental associado ao seu ciclo de vida (Golroudbary et al, 2022). Nesta perspetiva, há uma tendência global para melhorar a recuperação do cobalto a partir de produtos reciclados em fim de vida (Golroudbary et al, 2022).

Embora a reciclagem continue a apresentar grandes oportunidades, uma vez que os mercados de catalisadores, superligas, baterias e ímanes continuam a aumentar, alguns produtos que contêm cobalto ainda têm taxas de reciclagem muito baixas, como os ímanes e as baterias eletrónicas (Chandra et al, 2021).

A figura 38 ilustra os principais processos de reciclagem do cobalto, e os diferentes setores na qual esses processos se encaixam.

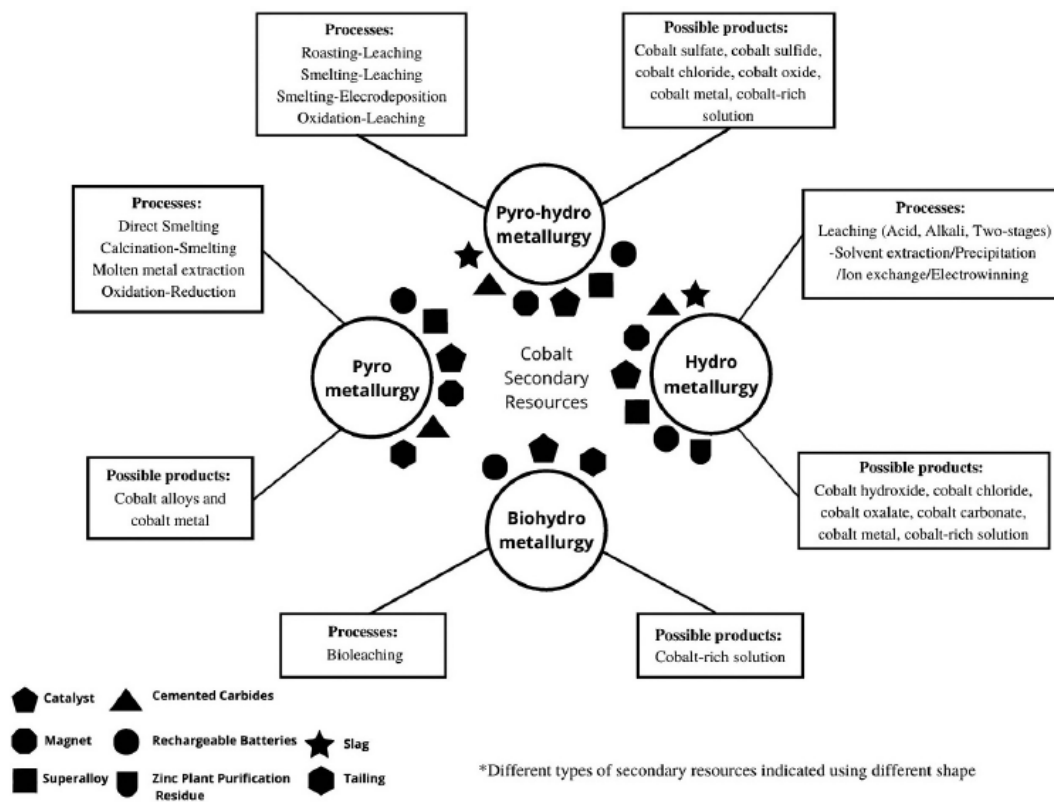


Figura 38-Síntese dos recursos secundários do cobalto com os respetivos processos de reciclagem (Chandra et al, 2021).

A pirometalurgia²⁵, hidrometalurgia²⁶ ou uma combinação dos dois processos são amplamente adotadas, como pode ser visto na figura acima.

De acordo com (Chandra et al, 2021), os processos pirometalúrgicos são menos eficientes para a valorização do cobalto, porém, é um processo que pode ser facilmente aplicado à escala industrial. Comparativamente, os processos hidrometalúrgicos estão a ser mais explorados devido ao melhor desempenho na recuperação do cobalto e ao menor custo de investimento. No entanto, produzem potencialmente grandes quantidades de águas residuais. O processo piro-hidrometalúrgico²⁷ parece ser uma ótima opção para o tratamento de superligas, metal duro e baterias recarregáveis. O processo bio-hidrometalúrgico²⁸ é mais amigo do ambiente, mas apresenta uma baixa eficiência e uma produção instável devido à utilização de organismos vivos.

5.2 Reciclagem do Cobre

Os processos de mineração e extração de cobre exigem grande consumo de energia, contribuem para o desmatamento e libtam emissões nocivas na atmosfera. Ao reciclar o cobre, podemos efetivamente reduzir a necessidade de novas atividades mineiras, conservar os recursos naturais e minimizar a pegada de carbono associada à sua produção.

A reciclagem do cobre requer menos 80 a 90% de energia do que a produção primária do mesmo (Euric, 2020). A nível mundial, isto permite poupar 40 milhões de toneladas de CO₂ por ano, o que equivale a retirar 16 milhões de veículos de passageiros da estrada (International Copper Association, 2017). A reciclagem de uma tonelada de cobre pode minimizar até 15 toneladas métricas de emissões de CO₂, tornando-se uma estratégia vital no combate as alterações climáticas (Faster Capital, 2024).

O cobre é um dos poucos materiais que pode ser reciclado repetidamente sem qualquer perda de desempenho. Também não há diferença na qualidade do cobre reciclado

²⁵A pirometalurgia é um processo metalúrgico que utiliza altas temperaturas (variando entre 500°C a 2000°C), podendo produzir metais puros, ligas ou compostos intermediários. Os processos mais utilizados são: calcinação, fundição, liga, pirólise, refinamento, secagem e torrefação (MATA, 2014).

²⁶ O processo hidrometalúrgico se baseia na separação de metais, onde sua fase mais importante é a prática de dissolução do material em soluções lixiviantes, ácidas ou alcalinas, seguida de etapas de separação como extração por solvente, precipitação, troca iônica, filtração e destilação para isolar e concentrar o material de interesse, nesse caso, o cobalto (MATA, 2014).

²⁷ Os métodos piro-hidrometalúrgicos são processos utilizados na extração e refinamento de metais que combinam técnicas de alta temperatura (pirometalúrgicas) e técnicas baseadas em soluções aquosas (hidrometalúrgicas). Estes métodos são utilizados para otimizar a recuperação de metais e aumentar a eficiência do processo. Eles são particularmente úteis quando se lida com minérios complexos ou materiais de reciclagem que não podem ser processados eficientemente usando apenas um único método (Dobó et al, 2023).

²⁸ A biometalurgia utiliza as interações entre os microrganismos (fungos ou bactérias) e minerais para recuperar os metais, principalmente ouro, cobre e cobalto (Zhuang et al, 2015).

(produção secundária) e do cobre extraído (produção primária), pelo que podem ser utilizados indistintamente (International Copper Association, 2022). Atualmente, um total de cerca de 8,7 milhões de toneladas de cobre por ano provêm da reciclagem de sucata “velha” (cobre contido em produtos em fim de vida) e sucata “nova” (gerada durante os processos de produção e de fabrico) (International Copper Association, 2022). A figura 39 abaixo mostra como a reciclagem é uma parte essencial da cadeia de valor global do cobre.



Figura 39-Cadeia de valor simplificada do cobre. Figura adaptada da (International Copper Association, 2022).

De acordo com (CuSP, 2024), pelo menos 65% de todo o cobre extraído desde 1900 ainda está em uso. Aproximadamente metade da procura europeia por esse material é atualmente satisfeita pelo fornecimento secundário do cobre, enquanto 30% da procura global é satisfeita por cobre reciclado (International Copper Association, 2022).

A reciclagem do cobre contribui para um movimento progressivo em direção a uma economia mais circular. Contudo, o ciclo não pode ser completamente fechado por duas razões. Em primeiro lugar, a procura continuará a aumentar devido ao crescimento populacional, à inovação de produtos e ao desenvolvimento económico. Em segundo lugar, na maioria das aplicações, o cobre permanece em uso durante décadas antes de estar pronto para ser reciclado e utilizado novamente. Consequentemente, a crescente procura de cobre exigirá uma combinação de matérias-primas provenientes de minas (cobre primário), bem como de materiais reciclados (cobre secundário).

Situada no final da cadeia de valor da reciclagem, a indústria do cobre desempenha um papel crucial ao “fechar o ciclo” e investe e inova constantemente para garantir a gestão circular dos metais. No entanto, é mais difícil recolher e reprocessar materiais cada vez mais complexos que contenham cobre, como a sucata eletrônica. Portanto, os esforços de apoio à reciclagem podem ser implementados na conceção de novos produtos para facilitar a recuperação no final da vida útil e os processos de reciclagem industrial para aumentar os rendimentos globais. Além disso, as políticas regulamentares devem continuar a incentivar a recuperação e a reciclagem, tanto a nível da indústria como por parte do cidadão individual (International Copper Association, 2022). Os principais métodos de reciclagem do cobre incluem hidrometalurgia, pirometalurgia e reciclagem mecânica²⁹ de acordo com (Kadhim, 2024).

5.3 Reciclagem do Níquel

Assim como o cobre, o níquel é totalmente reciclável. Pode ser reciclado inúmeras vezes sem perda das suas propriedades, contribuindo para o modelo de Economia Circular (EC). Segundo (GrisWorld, 2019), cerca de 68% de todo o níquel disponível em produtos de consumo é reciclado (um número que aumentou em relação aos cerca de 63% desde 2000), outros 15% entram no ciclo de aço carbono (neste processo, o aço é fundido em siderurgias e o teor de níquel é incorporado em novos produtos de aço como elemento de liga), e os outros 17% acabam em aterros sanitários.

De acordo com (INSG, 2024), estima-se que a sucata de produtos contendo níquel, totalizam uma quantidade de 4,4 – 4,6 milhões de toneladas por ano que podem ser coletadas e recicladas. Estima-se que esta sucata contenha quase 350.000 toneladas de níquel (ou um quarto da procura total) anualmente, que é utilizada principalmente pela indústria de aço inoxidável. A indústria de processamento de sucata de níquel consiste em quatro ou cinco grandes empresas que operam em nível internacional para garantir que a sucata contendo níquel seja coletada em todos os locais mundialmente. A maior parte da sucata é de aço inoxidável, resultante da demolição de fábricas, máquinas e equipamentos obsoletos e bens de consumo (INSG, 2024).

²⁹ A reciclagem mecânica é o processo de reciclagem utilizado não só para o cobre, como para diversas classes de materiais (plástico por exemplo). Os processos mecânicos, como a trituração, o esmagamento e a moagem, são utilizados para decompor os materiais que contêm cobre em pedaços ou pós mais pequenos. Estes materiais são depois fundidos ou processados para recuperar o cobre (BASF, 2024).

Esses materiais provenientes da sucata passam por triagem e processamento para isolar componentes contendo níquel, que são então refinados e purificados por meio de diversos métodos, incluindo processos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos (Metycle, 2024). Depois de purificado, o níquel reciclado pode ser reintroduzido no ciclo produtivo, servindo como matéria-prima para a fabricação de novos produtos. No entanto, apesar dos seus potenciais benefícios, a jornada da reciclagem do níquel tem os seus desafios. Um obstáculo significativo é a complexidade dos materiais que contêm níquel, que muitas vezes compreendem várias ligas e compostos (Metycle, 2024).

Essa complexidade complica o processo de reciclagem, exigindo técnicas avançadas de classificação e separação para extrair com eficiência componentes valiosos de níquel. Além disso, contaminantes e impurezas presentes nos materiais reciclados podem afetar negativamente a qualidade do produto final, necessitando de medidas rigorosas de controle de qualidade. A economia da reciclagem do níquel representa desafios para as partes interessadas da indústria. As flutuações nos preços das matérias-primas, juntamente com os elevados custos energéticos e operacionais associados aos processos de reciclagem, podem ter impacto na viabilidade das iniciativas de reciclagem. Além disso, a disponibilidade de infraestruturas e tecnologias de reciclagem varia entre regiões, influenciando a acessibilidade e a eficiência das práticas de reciclagem de níquel. Embora a reciclagem ajude a mitigar o impacto ambiental da produção de níquel primário, certos processos de reciclagem podem, eles próprios, gerar emissões e fluxos de resíduos (Metycle, 2024).

5.4 Reciclagem do Lítio

Ao observar o complexo cenário da elevada procura de lítio, inúmeras preocupações se levantam a cerca desse tema. Por exemplo, a extração do lítio é um processo que consome muita energia envolvendo combustíveis fósseis. Para produzir uma tonelada de lítio são emitidos cerca de 5 a 6 toneladas de CO₂ (Chandrasekharam et al, 2024). As emissões de CO₂ das baterias LFP, NMC e LMO de 28 KWh variam de 5.600 a 2.705 kg (Chandrasekharam et al, 2024).

Além disso, todos os anos milhões de baterias vão parar a aterros sanitários, podendo libertar produtos químicos tóxicos que prejudicam o meio ambiente. De acordo com (IER, 2023) 98,3 % das baterias de íões de lítio (LIBs) acabam em aterros sanitários, para além da poluição ambiental, aumenta a probabilidade de incêndios. Foi relatado que um aterro sanitário no noroeste do pacífico teve 124 incêndios entre junho de 2017 e dezembro de 2020 devido as LIBs (IER, 2023). Apenas cerca de 5% das baterias de lítio do mundo são recicladas, em comparação com 99% das baterias de chumbo para automóveis recicladas nos Estados Unidos (IER, 2023). A reciclagem das LIBs está a ser promovida pelos governos devido aos problemas ambientais associados, aos resíduos e à crescente procura das baterias à medida que são vendidos cada vez mais veículos eléctricos. No entanto, a reciclagem de baterias de lítio pode ser perigosa (IER, 2023) . O manuseamento incorreto pode levar a consequências perigosas, como curto-circuitos, combustão e libertação de fumos tóxicos. Além disso, a química e a construção diversificadas das baterias complicam a criação de sistemas de reciclagem eficientes. A presença de colas resistentes dificulta ainda mais o processo desmontagem, tornando economicamente viável para os fabricantes optarem por metais recentemente extraídos em vez de reciclados, apesar do aumento dos preços.

A reciclagem do lítio apresenta uma alternativa aos métodos de extração tradicionais, oferecendo vários benefícios ambientais, económicos e sociais. Ao recuperar o lítio das baterias em fim de vida e de outras fontes, a reciclagem reduz a necessidade de materiais virgens, minimiza os resíduos e diminui as emissões de gases com efeito de estufa. Além disso, a reciclagem ajuda a conservar os recursos naturais e a reduzir a dependência de práticas de extração prejudiciais ao ambiente. Embora saibamos todos os benefícios da reciclagem, esse método ainda tem estado a mover-se de forma lenta, devido a inúmeros fatores, entre esses a sua lucratividade. Segundo (Bento, 2022), é necessário de 6 a 10 vezes mais energia para recuperar metais de algumas baterias recicladas do que pelo processo de mineração. Acresce ainda o problema de atualmente não haver nenhuma tecnologia de reciclagem capaz de produzir lítio suficientemente puro para uma segunda utilização nas baterias (Bento, 2022).

Para além dos fatores descritos acima, a reciclagem do lítio enfrenta vários outros desafios e barreiras para uma adoção generalizada. Estes incluem a falta de processos de reciclagem padronizados, infraestruturas limitadas para recolha e triagem das baterias em fim de vida e complexidades técnicas na separação e purificação do lítio de outros materiais. Além disso, os quadros regulamentares e as políticas relacionadas com a reciclagem variam consoante as regiões, o que coloca desafios adicionais ao desenvolvimento de um ecossistema de reciclagem robusto.

A viabilidade económica da reciclagem do lítio depende de fatores como o custo das matérias-primas, as tecnologias de reciclagem e a procura do mercado de produtos de lítio reciclado. Embora a reciclagem possa oferecer poupanças de custos em comparação com a produção primária de lítio em determinados cenários, a economia da reciclagem é influenciada por fatores como as economias de escala, os preços da energia e os incentivos governamentais. Além disso, a dinâmica do mercado, incluindo flutuações nos preços das matérias-primas e na procura de baterias de íões de lítio, pode afetar a rentabilidade das operações de reciclagem.

Frequentemente, as aplicações das baterias de íões de lítio são rotuladas como “emissões zero”. No entanto, as emissões geradas na fase de aquisição e produção da cadeia de abastecimento não são consideradas (Golroudbary, 2019). A produção de baterias para veículos elétricos é um dos principais contribuintes para a emissão de gases de efeito estufa (GEE). Neste caso, é de extrema importância a reciclagem de LIBs para reduzir o consumo de energia e mitigar as emissões de GEE, bem como resultar numa poupança considerável de recursos naturais em comparação com a deposição em aterros sanitários. A reciclagem das baterias consome muita energia.

Os setores de reciclagem do lítio têm-se focado sobretudo nas baterias, devido a alta taxa de produção nesta área. No capítulo anterior vimos que 87% da produção mundial do Li são para as baterias, 4% para cerâmicas e vidros, e os restantes 9% para diversas outras aplicações (USGS, 2024).

A reciclagem das LIB apresenta grandes vantagens na economia de recursos naturais. Estima-se que a reciclagem pode economizar até 51% dos recursos naturais extraídos, incluindo a redução do uso de combustíveis fósseis e energia nuclear necessários nos processos de extração e produção (Costa et al, 2021). No entanto, alcançar a

independência total dos recursos virgens parece impossível, porque num mercado em constante crescimento, os recursos reciclados disponíveis são sempre inferiores à procura.

Devido à estrutura complexa e ao número de materiais presentes nas LIB, estas devem ser submetidas a uma variedade de processos antes da sua reutilização/reciclagem. As LIBs têm de ser primeiro classificadas e, na maioria das vezes, pré-tratadas através de descarga ou inativação, desmontagem e separação, após o que podem ser sujeitas a reciclagem direta, pirometalurgia, hidrometalurgia ou uma combinação de métodos, como pode ser visto na figura 40 (Costa et al, 2021).

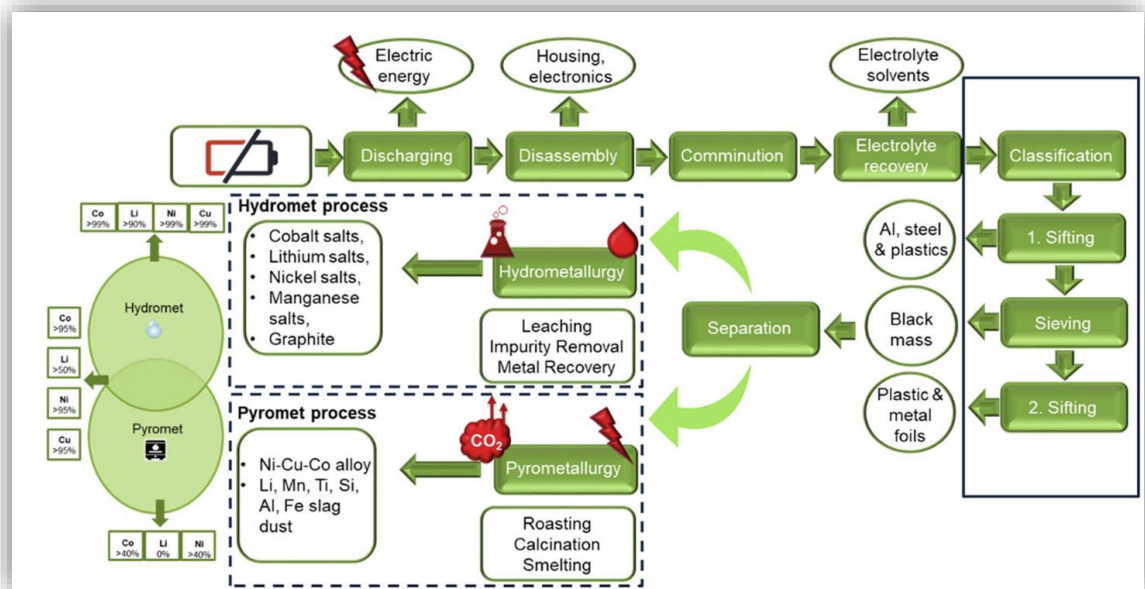


Figura 40-Visão geral do fluxograma de reciclagem das baterias de íons de lítio comparando os processos hidrometalurgia e pirometalurgia (Demopoulos, 2023).

A reciclagem de baterias de íons de lítio ainda não é lucrativa. Não existe até agora nenhuma tecnologia de reciclagem capaz de produzir lítio suficientemente puro para uma segunda utilização em baterias. Se a pureza do lítio estiver abaixo de 99,5%, então não é adequado como matéria-prima para as baterias (Bento, 2022). O lítio reciclado é usado para lubrificantes, vidro, cerâmica e outras aplicações (Bento, 2022).

O custo fixo para reciclar uma tonelada de baterias é aproximadamente 1000€ a 2000€. A Europa espera atingir um custo por tonelada de 300 €. Idealmente este valor incluiria o transporte, mas espera-se que a movimentação e o manuseamento das mercadorias dupliquem o custo (Bento, 2022). Para simplificar o transporte, a Europa está a instalar vários centros de processamento menores em localizações geográficas estratégicas. Isso, em parte, se deve à Convenção de Basileia que proíbe a exportação de baterias de chumbo-ácido completas, mas gastas. À medida que o volume de baterias usadas aumenta, novas tecnologias são testadas para tornar a reciclagem lucrativa sem apoios governamentais ou de instituições (Bento, 2022).

A reciclagem de baterias de veículos eléctricos é crucial por inúmeras razões como temos visto até então, que abrangem os domínios ambientais, económicos e tecnológicos. À medida que o mundo transita para soluções energéticas “sustentáveis”, os materiais das baterias continuem a ser um gargalo crítico neste processo, havendo realmente a necessidade de maior conscientização global e apoios políticos às partes interessadas. O aumento da consciencialização global é crucial para fomentar padrões de consumo sustentáveis e promover a adoção de materiais e tecnologias alternativas. As campanhas educativas, a cobertura mediática e o discurso público podem ajudar a sensibilizar para as consequências ambientais e sociais das atuais práticas de produção de baterias.

5.4 Reciclagem do índio

Como visto no capítulo anterior, o índio é um material crítico amplamente utilizado em diversas indústrias de alta tecnologia, particularmente na produção de displays de telas planas, células solares, componentes eletrónicos e LEDs. A escassez de fontes primárias e o aumento da procura por esses dispositivos tecnológicos reforçam a necessidade de estratégias eficazes para a recuperação e reciclagem do índio.

Devido à baixa concentração do índio nos produtos finais, a sua reciclabilidade média em fim de vida é quase insignificante, mas pode ser recuperado a partir da reciclagem de resíduos na produção (Calvo et al, 2022). Alguns ensaios mostraram que este metal pode ser substituído por outros compostos nos ecrãs planos, como óxido de estanho de antimônio (*Antimony Tin Oxide- ATO*)³⁰, ou os revestimentos de nanotubos de carbono

³⁰ O ATO é conhecido por suas propriedades como um material condutor transparente e é frequentemente utilizado em aplicações que exigem transparência ótica juntamente com condutividade elétrica, o mesmo é amplamente utilizado em telas sensíveis ao toque, monitores de tela plana e células solares. O óxido de estanho é produzido a partir de matérias-primas prontamente disponíveis e de

(Calvo et al, 2022). Como o *Copper indium gallium diselenid (CIGS)* utiliza índio e gálio, a reciclagem é necessária para garantir o fornecimento futuro de ambos os elementos.

Como não existem bons substitutos para o índio para uso em revestimentos de filme fino ITO, a pesquisa concentrou-se na reciclagem do índio a partir de suas principais aplicações de telas LCD e módulos fotovoltaicos, a fim de garantir o fornecimento de índio a longo prazo. Com base na literatura, diversos processos mecânicos, térmicos e hidrometalúrgicos bem como suas combinações, foram pesquisados (Hashimoto, 2015). Alguns métodos de decapagem (*pickling*)³¹ e extração seletiva à base de solvente requerem grandes quantidades de solventes potencialmente perigosos, levantando alguns outros problemas, como perdas por evaporação, resíduos de solventes e riscos à saúde (Jenni et al, 2016).

5.5 Reciclagem das terras raras

Os elementos terras raras (REE) são vitais para as tecnologias modernas e estão entre os elementos críticos mais preocupantes, pois normalmente apenas 1% dos REE são reciclados a partir de produtos finais, sendo o restante rejeitado para resíduos e removido do ciclo dos materiais (Jowitt, 2018).

Há dois tipos de reciclagem a considerar: a reciclagem pré-consumo, que envolve a reciclagem efetuada em sucata de fabrico, e a reciclagem pós-consumo, que significa a reciclagem de produtos em fim de vida. Esta última tem um maior potencial, uma vez que já foi produzida uma enorme quantidade de tecnologias com conteúdos de REE - resíduos eletrônicos, incluindo baterias de níquel-hidreto metálico, discos rígidos de computadores portáteis, telemóveis, caixas de som, entre outras tecnologias. As chamadas "minerações urbanas"³² representam um potencial de reciclagem de REE e de utilização em segunda vida em tecnologias ecológicas. A exploração mineira urbana ocorre quando os resíduos que normalmente acabam em aterros são processados para recuperação dos materiais contidos.

baixo custo, e sua produção não gera resíduos perigosos ou subprodutos nocivos. Além disso, o ATO é altamente durável e pode ser reciclado, o que o torna um candidato promissor para uma economia circular (Zhang et al, 2004).

³¹ O processo de decapagem (*pickling*), é uma etapa importante na reciclagem dos metais. Esse processo envolve a remoção de óxidos, ferrugem, contaminantes e outras impurezas da superfície do metal por meio de soluções ácidas. Este processo prepara o metal para etapas subsequentes de tratamento ou reutilização, garantindo uma superfície limpa e reativa.

³² A mineração urbana é o processo pela qual podem ser obtidas matérias-primas secundárias a partir da reciclagem de diversos tipos de resíduos. Uma alternativa sustentável à exploração de recursos não renováveis (Serranti, 2024).

As principais razões para baixa taxa de reciclagem das terras raras são: perda das propriedades dos materiais reciclados, falta de tecnologias de reciclagem eficientes, dinâmica da cadeia de abastecimento global, os baixos preços dos REE provenientes de recursos primários e o longo período de vida útil dos produtos que contêm REE (Depraite, 2023). Outro impedimento significativo é o facto de muitas tecnologias terem, um teor muito baixo de REE e as quantidades disponíveis de materiais não serem suficientes para justificar o investimento em reciclagem (Yoshiko Fujita, 2022).

Ao longo desse capítulo podemos observar que os principais métodos utilizados para a reciclagem dos metais são os métodos de pirometalurgia e hidrometalurgia. A escolha entre estes métodos depende de fatores como características do material, considerações ambientais, necessidades energéticas e viabilidade econômica. Ao compreender as distinções entre esses dois processos de reciclagem, as instalações de reciclagem podem otimizar seus processos para obter uma recuperação do metal, enquanto minimizam os impactos ambientais e os custos operacionais. Em última análise, a aplicação criteriosa destas técnicas contribui para a gestão sustentável e responsável dos recursos dos metais críticos no mercado global.

Capítulo 6

Conclusão

A transição energética para fontes renováveis, e as novas tecnologias desenvolvidas para este fim, como os painéis solares, turbinas eólicas e baterias de íões de lítio, dependem fortemente da disponibilidade de determinados materiais críticos, em particular o cobalto, cobre, níquel, lítio, índio e terras raras. Muitas das tecnologias digitais comumente utilizadas no nosso cotidiano são também fabricadas a partir destes materiais, como por exemplo os smartphones, laptops, tablets, telas planas de TVs, ecrans tácteis, displays de alta-definição, fones de ouvido, LED's, e muitos outros dispositivos e tecnologias incorporam esses elementos. Portanto, a medida há um aumento da utilização em massa destas novas tecnologias dispara também a procura global pelo cobalto, cobre, níquel, lítio, índio e terras raras.

Para além de serem considerados estratégicos em diferentes setores industriais (tecnologia, informação, indústria e segurança), estes materiais são considerados críticos, por apresentarem riscos de interrupção ou escassez, pois podem ter extração e processamento concentrados num pequeno número de países, em que a quantidade dos recursos naturais está a diminuir. Sendo necessário um aumento maciço da oferta, os preços têm apresentado grandes oscilações e refletem desequilíbrios entre a oferta e a procura. Cumpre salientar também que alguns destes materiais são subprodutos da mineração de outros materiais, como no caso do índio, cobalto, e terras raras (IRENA, 2021).

Neste trabalho foi realizado um estudo detalhado dos chamados materiais críticos para a transição energética, tendo sido realizadas estimativas quantitativas da produção mundial futura que foram comparadas com as reservas e recursos divulgados pelas organizações responsáveis, para assim avaliar se tais reservas ou recursos serão suficientes para atender às projeções do consumo futuro. Foi escolhido para esta análise o conjunto de materiais já mencionados acima, por serem considerados os mais críticos no presente cenário mundial.

A seguir são descritos sucintamente os principais aspetos e conclusões sobre este conjunto de materiais críticos.

Cobalto: atualmente 55% deste material é utilizado na fabricação de baterias de íons de lítio. Há perspectiva de um crescimento na procura do cobalto de 60% até 2050, conforme dados projetados a partir de 2023. Considerando o nível atual de produção de 230 mil toneladas, e as reservas mundiais de 11 milhões de toneladas, podemos afirmar que darão para suprir esta procura por mais 47 anos. Se consideramos os recursos estimados pela (USGS, 2024) de 25 milhões de toneladas, essa capacidade se estenderá por mais um século. No entanto, não podemos nos basear nos recursos, visto que os mesmos são inconstantes e a sua exploração acontecer depende de vários fatores económicos e políticos. Desta forma há uma preocupação crescente sobre o risco de interrupção na cadeia de suprimento deste material, principalmente por tratar-se de um metal secundário, obtido a partir da mineração do cobre e do níquel.

Cobre: este metal desempenha um papel crítico na transição energética devido sua ampla utilização em cabos condutores e sistemas de transmissão, geração e distribuição em redes elétricas, em turbinas eólicas, painéis solares e veículos elétricos. Os sistemas fotovoltaicos contêm aproximadamente 5 toneladas de cobre por megawatt (t/MW), enquanto as instalações de armazenamento de energia da rede utilizam entre 2,7 e 3,6 t/MW. A procura por cobre apenas nas fontes alternativas de energia está prevista aumentar de 210 mil toneladas em 2020 para 1,8 milhões de toneladas em 2030. Por outro lado, a procura por cobre para carregamento de veículos elétricos deverá crescer mais de 1.000% até 2030, em comparação com 2020.

As reservas atuais de cobre são estimadas em cerca em 890 milhões de toneladas. Com a produção atual de 22 milhões de toneladas, é previsto que essas reservas possam satisfazer as necessidades futuras por apenas 40 anos. Isso posiciona o cobre como um dos metais mais críticos na atual transição energética. Sua importância reside no fato de ser relativamente escasso na crosta terrestre, com recursos e reservas limitados, levantando preocupações crescentes sobre sua disponibilidade futura. De acordo com (Simon, 2024), se o mundo atingir o “net zero em emissões” pelo menos através eletrificação global, iremos necessitar de 200 novas minas de cobre aos longo dos próximos 30 anos.

Níquel: amplamente utilizado desde há muitos anos na produção de aços inoxidáveis, o níquel emergiu como um material crítico para a produção de baterias de íões de lítio, fabricação de componentes para as turbinas eólicas e sistemas conectores nos painéis solares. Tendo em conta o volume de produção atual de 3,6 milhões de toneladas métricas e reservas atuais de 100 milhões de toneladas, mal daria para os próximos 30 anos, visto que a procura por essas novas tecnologias se intensificará. Cumpre ressaltar, entretanto, que se levarmos em conta a quantidade de reservas atuais, mais os recursos estimados de 350 milhões de toneladas, teremos um total de cerca de 450 milhões de toneladas, e assim, com base no consumo atual, poderemos dilatar o horizonte de esgotamento desse material para cerca de um século.

Lítio: diferentemente do caso do cobre e níquel, este material é bastante abundante na crosta terrestre, sua maior criticidade está relacionada com seu nível elevado de reatividade e inflamabilidade especialmente quando exposto à água e ao ar, sendo necessários procedimentos rigorosos de manuseio e armazenamento. Atualmente, 87% da produção mundial de lítio está direcionada para as baterias de íões de lítio. Se a procura por esse material permanecer a crescer de forma linear tal como mostra a tendência atual, a produção mundial acumulada entre 2024 e 2050 poderá exceder 5 milhões de toneladas métricas, com um aumento de 42% em relação a 2023. Segundo a (IEA, 2022), é previsto que haja aproximadamente 350 milhões de automóveis elétricos globalmente até 2030. Com base nas reservas globais de lítio entre 2010 e 2024, estima-se que teremos 42 milhões de toneladas de Li disponíveis em 2030. Considerando que uma bateria típica de veículo elétrico contém aproximadamente 8 kg de lítio, os 350 milhões de veículos elétricos necessitarão de aproximadamente 2,8 milhões de toneladas desse metal. Portanto, é possível atender essa procura dos veículos elétricos segundo as projeções atuais.

Caso haja uma eletrificação a nível global de toda a frota de automóveis, necessitaríamos de 11,44 milhões de toneladas de lítio para eletrificar 1,43 mil milhões de veículos existentes atualmente. É importante ressaltar que a quantidade de lítio utilizada nas baterias depende de sua configuração, capacidade e modelo do veículo, podendo assim, esses valores serem variáveis consoantes esses fatores. Apesar disso, diante da quantidade necessária para a mobilidade elétrica, a procura por lítio pode ser atendida devido à sua

elevada disponibilidade na crosta terrestre, embora tal nível necessário de produção de lítio implique em imensos problemas de natureza ambiental.

Índio: este metal emergiu como fundamental para indústrias de alta tecnologia, destacando-se pela sua ampla aplicação em ecrãs planos e tácteis, que dominam 65% do mercado, além de ser essencial na produção de painéis solares de seleneto de cobre-índio-gálio (CIGS), onde atualmente cerca de 23 kg de índio são usados por megawatt. Com a crescente procura, espera-se um aumento de mais de 1000% em comparação com as 125 toneladas consumidas em 1990 e as projetadas 1780 toneladas para 2050.

Com base no valor das reservas atuais de 25 693 toneladas, se utilizarmos como referência o consumo relativo a 2023 (990 t), podemos calcular que as reservas dariam para apenas mais 25 anos. Portanto, podemos classificar o índio como um elemento muito crítico, devido a sua baixa disponibilidade, produção, reservas e preços. Acresce ainda o problema de ser um mineral predominantemente extraído como um subproduto na extração dos metais base como cobre, zinco e chumbo; assim qualquer perturbação nestas cadeias de abastecimento tem um impacto direto na produção de índio, colocando desafios significativos às indústrias que dependem da sua utilização.

Terras raras (rare earth elements - REE): como foi demonstrado neste trabalho, este conjunto de materiais são essenciais em diversos setores industriais (eletrónicos, energias renováveis, automotivo, aeronáutica e defesa, tecnologia de informação e comunicação, iluminação, medicina, catalisadores, vidros e cerâmicas, ímãs e motores elétricos). No contexto das energias renováveis, as terras raras, especificamente o neodímio, o praseodímio, o disprosio, e o térbio, representam um papel de destaque na fabricação de ímãs permanentes para as turbinas eólicas e componentes para os painéis solares. Nos últimos nove anos a produção desses elementos cresceu um fator de 169%, podendo haver uma taxa de crescimento superior a 700% em 2050 em relação a 2015. Se a procura por tecnologias de diversos setores, sobretudo as energias renováveis, continuar a crescer a este ritmo de 169% por ano, as reservas mundiais conhecidas de 130 milhões de toneladas métricas poderão estar esgotadas em 2060. Outros autores apresentaram prognósticos mais otimistas baseados numa estimativa mais ampla dos recursos globais de 478 milhões de toneladas e afirmam que estes recursos são suficientes para satisfazer a procura global nos próximos cem anos. Uma das grandes preocupações em relação às terras raras é o

fato da China ser o maior produtor global desses elementos, tendo no momento o controle absoluto sobre esses minerais.

Podemos notar que todos esses materiais possuem reservas e recursos bastante limitados, podendo se esgotar muito antes que as metas ambientais impostas no Acordo de Paris sejam alcançadas. Desta forma, para satisfazer essa procura, será necessário uma taxa elevada de mineração e extração. Embora alguns destes materiais sejam abundantes na crosta terrestre, será inevitável a abertura de novas minas.

Para além destes fatores, a utilização intensiva destes materiais tem promovido uma série de impactos ambientais, sociais e económicos. Em consequência da intensa extração, mineração e processamento dos materiais, os danos ambientais como destruição de habitats naturais, poluição do solo e da água, emissão de gases poluentes, impacto na qualidade do ar, consumo de água, ruídos, riscos de erosão e geração de resíduos têm crescido a um ritmo alarmante nas últimas décadas. Em relação ao impacto social, a mineração está frequentemente associada a condições de trabalho precárias, violações dos direitos humanos, trabalho infantil e impactos negativos nas comunidades locais. A mineração do cobalto, por exemplo, tem levantado algumas questões em relação aos problemas relacionados com os direitos humanos, pois muitos mineradores trabalham em condições sub-humanas e degradantes, resultando em um número incontável de mortes devido não só às condições de trabalho, como também devido à poluição generalizada.

Diante deste cenário de esgotamento de recursos naturais e imensos impactos ambientais da transição energética, e outros impactos socioeconómicos interligados, a reciclagem destes materiais surge como um aspecto fundamental na gestão sustentável dos recursos, minimização da dependência de extração dos metais primários, e redução dos impactos ambientais, sociais e económicos. De fato as organizações reconhecem que o investimento neste setor poderá trazer retornos positivos. A (EJF, 2023) enfatiza que o modelo de reciclagem e economia circular podem reduzir a procura primária do cobre em 55%, cobalto 35%, níquel 35% e lítio 25% para 2040, assim como reduzir as emissões de GEE em 39% (22,8 mil milhões de toneladas) até 2030.

O cobre e níquel são um dos poucos materiais críticos que podem ser reciclados repetidamente sem qualquer perda de desempenho. A reciclagem do cobre requer menos 80 a 90% de energia do que a produção primária do mesmo. A nível mundial, isto permite poupar 40 milhões de toneladas de CO₂ por ano, o que equivale retirar 16 milhões de veículos de passageiros da estrada. Em relação ao níquel, cerca de 68% deste material disponível em produtos de consumo é reciclado (um número que aumentou em relação aos cerca de 63% desde 2000). Estima-se que a sucata de produtos contendo níquel totalize entre 4,4 e 4,6 milhões de toneladas por ano, que podem ser coletadas e recicladas. Essa sucata contém cerca de 350.000 toneladas de níquel anualmente, o que corresponde a aproximadamente um quarto da procura total, sendo utilizada principalmente pela indústria de aço inoxidável.

Embora as estimativas de reciclagem acima mencionadas sejam bem otimistas, os níveis atuais de reciclagem do cobalto, índio e terras raras possuem taxas de reciclagem extremamente baixas. De acordo com (IER, 2023) 98,3 % das baterias de íões de lítio acabam em aterros sanitários, logo, como 55% do cobalto e 15% do níquel são utilizados nas baterias, consequentemente esses materiais acabam sendo descartados. Por outro lado, no caso do índio, milhões de painéis solares foram instalados nas últimas duas décadas, e como normalmente duram entre 25 e 30 anos, muitos estarão em breve prontos para serem retirados, e como os níveis de reciclagem em painéis solares são baixos devido a vários fatores, muito provavelmente irão para aterros sanitários. Desta forma, encontrar medidas eficazes de reciclagem desse material será imprescindível, visto que o mesmo apresenta alto risco de interrupção. No caso das terras raras, apenas 1% dos REE são reciclados a partir de produtos finais, sendo o restante rejeitado para resíduos e removido do ciclo dos materiais.

Atualmente os principais métodos de reciclagem tem sido a pirometalurgia, hidrometalurgia, ou combinação dos dois processos, devido ao seu alto desempenho nos processos de recuperação dos metais em fim de vida. Mas deve-se destacar, entretanto, que, como em todos os processos industriais, estes processos são também grandes consumidores de energia primária, criando assim um círculo vicioso de consequências ainda imprevisíveis.

Bibliografia

- Akbar et al, 2023. Lithium Reserves by Country: Top 15 Countries. Available at: <https://finance.yahoo.com/news/lithium-reserves-country-top-15-184450553.html>
- Association International Copper, 2021. Copper Recycling. Available at: <chrome-extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3A%2F%2Fcopperalliance.org%2Fwp-content%2Fuploads%2F2022%2F02%2FICA-RecyclingBrief-202201-A4-R2.pdf>
- Basf, 2024. Mechanical Recycling. Available at: <https://www.basf.com/global/en/who-we-are/sustainability/we-drive-sustainable-solutions/circular-economy/mechanical-recycling.html>
- Borges et al, 2016. Renewable energy: a contextualization of the biomass as power supply. Available at: https://www.researchgate.net/publication/314298285_Renewable_energy_a_contextualization_of_the_biomass_as_power_supply.
- Becquet, 2023. The Challenge of Rare Earth Recycling. Available at: <https://leyton.com/ca/insights/articles/the-challenge-of-rare-earth-recycling/>
- Bento, 2022. Baterias de lítio Würth M-Cube, suas tipologias, durabilidade e reciclagem. Setembro, p. 86. Available at: chrome-extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3A%2F%2Frepositorio-cientifico.uatlantica.pt%2Fbitstream%2F10884%2F1517%2F1%2Ftese_mestrado_bruno%2F520bento_vf%2520%25281%2529.pdf
- Britannica, 2024. Industrial Revolution Available at: <https://www.britannica.com/event/Industrial-Revolution>
- Calvo et al, 2022. strategic mineral resources: availability and future estimations for the renewable energy sector. environmental development, 41(100640). available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211464521000373>
- Chandrasekharam et al, 2024. Lithium: An energy transition element, its role in the future energy demand and carbon emissions mitigation strategy. Geothermics, 119(102959). Available: https://www.researchgate.net/publication/378307131_Lithium_An_energy_transition_element_its_role_in_the_future_energy_demand_and_carbon_emissions_mitigation_strategy
- Crownhart, 2021. MIT Technology Review. Available at: <https://www.technologyreview.com/2021/08/19/1032215/solar-panels-recycling/>
- Candelisea et al, 2011. Materials availability for thin film (TF) PV technologies development: A real concern? Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier, Volume 15, p. 12. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211100298x>
- Carrara et. al, 2020. Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system. Available: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC119941>

Chandra et al, 2021. Recovery of Cobalt from Secondary Resources: A Comprehensive Review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 29 Abril, Volume 43, p. 679–700. Available: <https://www.scribd.com/document/679448445/Recovery-of-Cobalt-from-Secondary-Resources-A-Comprehensive-Review>

Costa et al, 2021. Recycling and environmental issues of lithium-ion batteries: Advances, challenges and opportunities. *Elsevier - Energy Storage Materials*, Maio, Volume 37, pp. 433-465. Available: https://www.researchgate.net/publication/349524161_Recycling_and_environmental_issues_of_lithium-ion_batteries_Advances_challenges_and_opportunities

Cusp, 2024. Copper Sustainability Partnership. Available at: <https://www.cuspuk.com/news/how-copper-recycling-benefits-the-environment/>

Carraca, 2020. Publications Office of the European Union, 2020. Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - A foresight study. Available: [chrome-extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3a%2f%2firms.jrc.ec.europa.eu%2fuploads%2firms_for_strategic_technologies_and_sectors_in_the_eu_2020.pdf](https://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3a%2f%2firms.jrc.ec.europa.eu%2fuploads%2firms_for_strategic_technologies_and_sectors_in_the_eu_2020.pdf)

Depraeter et al, 2023. The role and challenges of rare earths in the energy transition. *Resources Policy*, 86(104137), p. 41. 8 September. Available: [chrome-extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3a%2f%2fshs.hal.science%2fhalshs04199796%2ffile%2ffree_in_energy_transition_dg.pdf](https://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3a%2f%2fshs.hal.science%2fhalshs04199796%2ffile%2ffree_in_energy_transition_dg.pdf)

Dusukov, 2022. Role of minerals in global energy transition. Rel. HYPERLINK "https://webthesis.biblio.polito.it/view/relators/Blengini=3AGiovanni_Andrea=3A=3A.html" Giovanni Andrea Blengini. Politecnico di Torino, Corso di laurea magistrale in Petroleum and Mining Engineering (Ingegneria Del Petrolio E Mineraria). Available: <https://webthesis.biblio.polito.it/23050/>

Dushyantha et al, 2020. The story of rare earth elements (REEs): Occurrences, global distribution, genesis, geology, mineralogy and global production. *Ore Geology Reviews*, 122(103521). Available: https://www.researchgate.net/publication/340468310_The_story_of_rare_earth_elements_REEs_Occurrences_global_distribution_genesis_geology_mineralogy_and_global_production

Devezas, T. et al (2024) - The pace of the green transition: forces acting upon and probable main causes of the observed slow rhythm of change, *Sustainability* - to be published.

Dias et al, 2018. Cobalt: demand-supply balances in the transition to electric mobility. Available: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC112285>

Dias et al, 2020. the role of rare earth elements in wind energy and electric mobility. An analysis of future supply/demand balances, p. 43. Available: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC122671>

Dobó et al, 2023. A review on recycling of spent lithium-ion batteries. *Energy Reports*, Dezembro. Number 9(10):6362-6395. Available:

https://www.researchgate.net/publication/372419712_A_review_on_recycling_of_spent_lithium-ion_batteries

Elshkaki et al, 2015. Solar cell metals and their hosts: A tale of oversupply and undersupply. Elsevier, Volume 158. Available:
https://www.researchgate.net/publication/281319454_Solar_cell_metals_and_their_hosts_A_tale_of_oversupply_and_undersupply

EIA, 2024. Available at: <https://www.eia.gov/energyexplained/solar/solar-thermal-power-plants.php?text=Solar%20thermal%2Delectric%20power%20systems,focus%20sunlight%20onto%20a%20receiver>.

EJF, 2023. Critical minerals and the green transition. do we need to mine the deep seas? p. 27. Available: chrome extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3A%2F%2Ffoundation.org%2Fresources%2Fdownloads%2FEJF_critical-minerals-and-the-green-transition.pdf

Euric, 2020. Metal Recycling Factsheet
Available at: <https://circulareconomy.europa.eu/platform/en/knowledge/metal-recycling-factsheet-euric>

Faster Capital, 2024. Hyperlink "<https://fastercapital.com/topics/successful-copper-recycling-initiatives.html>" Successful Copper Recycling Initiatives. Available at: <https://fastercapital.com/topics/successful-copper-recycling-initiatives.html>

Faber et al, 2017. Artisanal Mining, Livelihoods, and Child Labor in the Cobalt Supply Chain of the Democratic Republic of Congo, 6 Maio, p. 61. Available: chrome extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3A%2F%2Fcega.berkeley.edu%2Fassets%2Fcega_research_projects%2F179%2Fcega_report_v2.pdf

Farjana et al, 2019. Life cycle assessment of cobalt extraction process. Journal of Sustainable Mining, Volume 18, pp. 150-161. Available:
https://www.researchgate.net/publication/331553955_Life_cycle_assessment_of_cobalt_extraction_process

Fernández, 2023. Statista. Cumulative installed wind power capacity worldwide from 2001 to 2023(in gigawatts). Available at:
<https://www.statista.com/statistics/268363/installed-wind-power-capacity-worldwide/>

GlobalData, 2023. Rare Earth Metals Market Size, Share, Trends, and Analysis by Region, Product, Application and Segment Forecast to 2030. Available at:
<https://www.globaldata.com/store/report/rare-earth-metals-market-analysis/#:text=Rare%20Earth%20Metals%20Market%20Segmentation%20by%20Application&text=The%20growing%20prominence%20of%20the,growth%20over%20the%20near%20future.&text=Catalysts%20turned%20o>

Gómez et al, 2023. Securing Indium Utilization for High-Tech and Renewable Energy Industries. 3 Fevereiro, p. 18. Available:
https://www.researchgate.net/publication/368244995_Securing_Indium_Utilization_for_High-Tech_and_Renewable_Energy_Industries

Gorman et al, 2022. Potential global GHG emissions reduction from increased adoption of metals recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 184(106424). Available: https://www.researchgate.net/publication/361050599_Potential_global_GHG_emissions_reduction_from_increased_adoption_of_metals_recycling

Globalsyde, 2022. História da transição energética desde 1800. Available at: <https://globalsyde.com/pt/blog/historia-da-transicao-energetica/>

Government of Canada, 2024. Lithium facts. Available at: <https://natural-resources.canada.ca/our-natural-resources/minerals-mining/mining-data-statistics-and-analysis/minerals-metals-facts/lithium-facts/24009>

Graedel et al 2022, Available: chrome extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3A%2F%2Fwww.osti.gov%2Fservlets%2Fpurl%2F19817422022. U.S. Cobalt: A Cycle of Diverse and Important Uses. 184(106441).

Graedel, 2011. On the Future Availability of the Energy Metals. 30 Março. Available: https://www.researchgate.net/publication/234146369_On_the_Future_Availability_of_the_Energy_Metals

Hartman, 2023. Wind Turbines: the Bigger, the Better. *Energy Efficiency and Renewable Energy*. Available at: <https://www.energy.gov/eere/articles/wind-turbines-bigger-better>

Helmenstine, 2021. Cobalt Facts and Physical Properties. Available at: <https://www.thoughtco.com/cobalt-element-facts-606520>

HPAL, 2022. Teknologi HPAL. Available at: <https://hpalnickel.com/about/technology>

International Copper Association, 2022. Industry and the Power Grid. Available: chrome extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3a%2f%2finternationalcopper.org%2fwp-content%2fuploads%2f2022%2f02%2fica-ir-industrygrid-202202-r2.pdf

IEA, 2017. *Energy Technology Perspectives. Catalysing Energy Technology Transformations*, p. 441. Available: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2017>

IEA, 2023, *Renewable Energy Market Update- June 2023*, IEA, Paris. Available: <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-june-2023>, License: CC BY 4.0

IEA, 2021. *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*. Maio, p. 287. Available at: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>

IEA, 2022. *By 2030 EVs represent more than 60% of vehicles sold globally and require an adequate surge in chargers installed in buildings*. Available: <https://www.iea.org/reports/by-2030-evs-represent-more-than-60-of-vehicles-sold-globally-and-require-an-adequate-surge-in-chargers-installed-in-buildings>

IEA, 2024. *Global EV Outlook 2024*. Available at: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>

IEA, 2024. The world's electric car fleet continues to grow strongly, with 2024 sales set to reach 17 million. Available at: <https://www.iea.org/news/the-worlds-electric-car-fleet-continues-to-grow-strongly-with-2024-sales-set-to-reach-17-million>

IEA, 2024. Trends in electric cars. Available at: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-electric-cars>

IEA, 2021. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. Available at: [chrome extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3A%2F%2Fiea.blob.core.windows.net%2Fassets%2Fffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc%2FTheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf](https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-electric-cars)

INSG, 2024. International Nickel Study Group- INSG. Recycling of Nickel Containing Products Available at: <https://insg.org/index.php/about-nickel/recycling-and-environment/>

International Copper Association, 2024. Copper Recycling. Available at: <https://internationalcopper.org/resource/copper-recycling/>

IRENA, 2021. Critical Materials for The Energy Transition. Available at: <https://www.irena.org/Technical-Papers/Critical-Materials-For-The-Energy-Transition>

IRENA, 2022. Critical Materials for The Energy Transition: Rare Earth elements. Available at: <https://www.irena.org/Technical-Papers/Critical-Materials-For-The-Energy-Transition-Rare-Earth-elements>

IRENA, 2023. World Energy Transitions Outlook. Available at: <https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>

IRENA, 2024. Wind Energy. Available at: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Wind-energy#:~:text=Today's%20new%20wind%20power%20projects,cube%20of%20the%20wind%20speed.>

International Copper Association, 2024. Aplicabilidade do cobre. Available: <https://internationalcopper.org/resource/copper-recycling/>

International Copper Association, 2022. Reciclagem do cobre. Available: <https://internationalcopper.org/resource/copper-recycling/>

Jennifer, 2024. Carbon Credits. Why Lithium Prices are Plunging and What to Expect Available at: <https://carboncredits.com/why-lithium-prices-are-plunging-and-what-to-expect/>

Jaganmohan, 2024. Statista. Mine production of rare earth elements worldwide from 2010 to 2023(in 1,000 metric tons REO). Available at: <https://www.statista.com/statistics/1187186/global-rare-earths-mine-production/>

Jowitt et al, 2018. Recycling of the rare earth elements. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, Volume 13, pp. 1-7. Available: https://www.researchgate.net/publication/323502917_Recycling_of_the_Rare_Earth_Elements

- Kashyap et al, 2022. Extraction and recovery of zinc and indium from residue rich in zinc ferrite. *Minerals Engineering*, volume 176, pages 107364. Available at: <https://colab.ws/articles/10.1016%2Fj.mineng.2021.107364>
- Keheng, 2023. Bateria de fosfato de ferro e lítio vs. Íon-lítio Available at: <https://www.lithiumbatterytech.com/pt/lithium-iron-phosphate-battery-vs-lithium-ion/>
- KGS, 2024. Sputtering is a technique for forming high-quality thin films. Available at: <https://global.techno-kitagawa.com/product/sputtering/summary.html>
- Lenntech, 2024. Chemical elements listed by melting point. Available at: <https://www.lenntech.com/periodic-chart-elements/melting-point.htm>
- Lokanc et al, 2015. The Availability of Indium: The Present, Medium Term, and Long Term, EUA: National Renewable Energy Laboratory (NREL). Available at: <chrome-extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3A%2F%2Fwww.nrel.gov%2Fdocs%2Ffy16osti%2F62409.pdf>
- Matos et al, 2020. Material System Analysis of five battery- related raw materials: Cobalt, Lithium, Manganese, Natural Graphite, Nickel, Available at: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC119950>
- Mendes et al, 2010. Gestão ambiental na indústria de mineração no brasil: técnicas para minimizar potenciais impactos ambientais na extração do cobre. *Gestão ambiental na indústria de mineração no brasil: técnicas para minimizar potenciais impactos ambientais na extração do cobre*. Available at: <chrome-extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3A%2F%2Fwww.ibeas.org.br%2Fcongresso%2FTrabalhos2010%2FXI-009.pdf>
- Metycle, 2024. Nickel scrap recycling: maximizing value for sustainable industry growth. Available at: <https://metycle.com/articles/nickel/nickel-scrap-recycling-sustainable-industry-growth>
- MIT, 2022. Climate Portal, Mit Climate Portal. How much CO2 is emitted by manufacturing batteries? Available at: <https://climate.mit.edu/ask-mit/how-much-co2-emitted-manufacturing-batteries>
- Monteiro et al, 2019. Índio: uma visão científica e tecnológica de um metal estratégico. Available at: <chrome-extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3a%2f%2fwww.scielo.br%2fj%2fq%2fa%2fbjyk3tmdnwlqfpvnhm7y3f%2f%3ffor%3dmat%3dpdf%26lang%3dpt>
- Moreno et al, 2021. Recovery of indium from jarosite residues of zinc refinery by a hydrometallurgical process. *Hydrometallurgy*, 203(105697), p. 7. Available at: https://www.researchgate.net/publication/352765189_Recovery_of_indium_from_jarosite_residues_of_zinc_refinery_by_a_hydrometallurgical_process
- Niquel Institute, 2024. Available at: <https://nickelinstitute.org/en/nickel-applications/>

Nickel Institute, 2020. Nickel life cycle data. Available at:
<https://nickelinstitute.org/en/policy/nickel-life-cycle-management/nickel-life-cycle-data/>

Nunes, 2020. Energia eólica offshore: um estudo de caso para análise da viabilidade técnico-econômica de uma usina próxima à costa do Rio Grande do Norte. Maio, p. 219.

Parlamento Europeu, 2023. Available at:
<https://www.europarl.europa.eu/topics/pt/article/20151201STO05603/economia-circular-definicao-importancia-e-beneficios>

Pisanó, 2019. Input of advanced geotechnical modelling to the design of offshore wind turbine foundations. Apport de la modélisation géotechnique avancée au dimensionnement de fondations d'éoliennes offshore. Proceedings of the XVII ECSMGE-2019. Available at: chrome-extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3a%2f%2fwww.ecsmge-2019.com%2fuploads%2f%2f1%2f7%2f9%2f21790806%2f1099-ecsmge-2019_pisano_bs_lecture.pdf

Ritchie, 2023. Is cobalt the 'blood diamond of electric cars'? What can be done about it?. Electric cars are now the biggest driver of cobalt demand. Most of this is mined from the DRC, where working conditions are incredibly poor. Available at:
<https://www.sustainabilitybynumbers.com/p/cobalt>

Roig, 2024. National Geographic Espanã. Propiedades del cobre (Cu)
Available at: https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/propiedades-cobre-cu_21925

Romero et al, 2021. Improving the rotary kiln-electric furnace process for ferronickel production: Data analytics-based assessment of dust insufflation into the rotary kiln flame. Alexandria Engineering Journal, Volume 61, pp. 3215-3228. Available at:
https://www.researchgate.net/publication/354631067_Improving_the_rotary_kiln-electric_furnace_process_for_ferronickel_production_Data_analytics-based_assessment_of_dust_insufflation_into_the_rotary_kiln_flame

S&P Global, 2022. The Future of Copper Will the looming supply gap short-circuit the energy transition?. Available: chrome-extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3a%2f%2fcdn.ihsmarkit.com%2fwww%2fpdf%2f0722%2fthe-future-of-copper_full-report_14july2022.pdf

Sterba et al, 2019. Lithium mining: Accelerating the transition to sustainable energy. Resources Policy, Volume 62, pp. 416-426. Available at:
https://www.researchgate.net/publication/334839990_Lithium_mining_Accelerating_the_transition_to_sustainable_energy

Silva, 2018. Modelo de competitividade e risco na mineração de terras-raras (MCRM-TR) e estudo de caso Brasil. Available at: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/19679>

Simon, 2024. Brasil Mineral. O mundo precisaria de 200 novas grandes minas de cobre nos próximos 30 anos. Available at: <https://www.brasilmineral.com.br/noticias/o-mundo-precisaria-de-200-novas-grandes-minas-de-cobre-nos-proximos-30-anos>

Statista, 2021. Statista. Weight of metal lost if not recycled after the end of a lithium-ion battery life in 2020 with a forecast for 2030 (in kilograms)

Available at: <https://www.statista.com/statistics/1247675/weight-of-metal-in-lithium-ion-batteries/>

Socio, 2022. GreenBiz. Solar panels have come a long way. Recycling them has not

Available at: <https://www.greenbiz.com/article/solar-panels-have-come-long-way-recycling-them-has-not>

Sokhna et al, 2021. Potential bottleneck in the energy transition: The case of cobalt in an accelerating electro- mobility world. Potential bottleneck in the energy transition: The case of cobalt in an accelerating electro- mobility world, 06 Dezembro.

Statista, 2023. Cumulative installed solar PV capacity worldwide from 2000 to 2022(in megawatts). Available at: <https://www.statista.com/statistics/280220/global-cumulative-installed-solar-pv-capacity/>

Statista, 2024. Year-over-year change in natural gas production worldwide from 2021 to 2022, by leading country (in billion cubic meters). Available at:

<https://www.statista.com/statistics/264771/top-countries-based-on-natural-gas-production/>

Statista, 2024. Distribution of primary nickel consumption worldwide in 2022, by industry. Available at: <https://www.statista.com/statistics/545041/distribution-of-nickel-consumption-worldwide-by-industry/>

Statista, 2024. Mine production of nickel worldwide from 2010 to 2023(in 1,000 metric tons). Available at: <https://www.statista.com/statistics/260748/mine-production-of-nickel-since-2006/>

Statista, 2024. Statista. Mine production of lithium worldwide from 2010 to 2023(in metric tons of lithium content). Available at:

<https://www.statista.com/statistics/606684/world-production-of-lithium/#:~:text=The%20world's%20mine%20production%20of,at%20about%2028%2C100%20metric%20tons.>

Sverdrup et al, 2024. Modeling Indium Extraction, Supply, Price, Use and Recycling 1930–2200 Using the WORLD7 Model: Implication for the Imaginaries of Sustainable Europe 2050. Natural Resources Research, Volume 33, pp. 539-570.

Sterba et al, 2019. Lithium mining: Accelerating the transition to sustainable energy.

Resources Policy, Volume 62, pp. 416-426. Available at:

https://www.researchgate.net/publication/334839990_Lithium_mining_Accelerating_the_transition_to_sustainable_energy

Tsiropoulos et al, 2020. Towards net-zero emissions in the EU energy system by 2050, EUR 29981 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-13097-0, doi:10.2760/062347, JRC118592. Available at:

<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC118592>

Tsurukawa et al, 2011. Social impacts of artisanal cobalt mining in Katanga, Democratic Republic of Congo. Available at: chrome-

extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3A%2F%2Fwww.oeko.de%2Foekodoc%2F1294%2F2011-419-en.pdf

United Nations, 2024. What is renewable energy?. Available at:
<https://www.un.org/en/climatechange/what-is-renewable-energy>

USGS, 2021. Copper Statistics and Information. Available at:
<https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/copper-statistics-and-information>

USGS, 2021. Cobalt Statistics and Information. Available at:
<https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/cobalt-statistics-and-information>

USGS, 2023. Nickel Statistics and Information. Available at:
<https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/nickel-statistics-and-information>

USGS, 2023. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. Available at:
chrome-extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3A%2F%2Fpubs.usgs.gov%2Fperiodicals%2Fmcs2023%2Fmcs2023.pdf

USGS, 2024. Copper Statistics and Information. Available at:
<https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/copper-statistics-and-information>

USGS, 2024. Nickel. Available at: chrome-extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3A%2F%2Fpubs.usgs.gov%2Fperiodicals%2Fmcs2024%2Fmcs2024-nickel.pdf

USGS, 2024. Cobalt. Available at: chrome-extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3A%2F%2Fpubs.usgs.gov%2Fperiodicals%2Fmcs2024%2Fmcs2024-cobalt.pdf

USGS, 2024. Lithium Statistics and Information. Lithium Statistics and Information. Available at: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/lithium-statistics-and-information>

USGS, 2024. Indium Statistics and Information. Available at:
<https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/indium-statistics-and-information>

USGS, 2024. Rare Earths Statistics and Information. Available at:
<https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/rare-earths-statistics-and-information>

Venditti, B., 2021. Visualizing Copper Demand for Renewables. Available at:
<https://www.visualcapitalist.com/sp/visualizing-copper-demand-for-renewables/>

Venditti, B., 2024. The World's Biggest Oil Producers in 2023. Available at:
<https://www.visualcapitalist.com/the-worlds-biggest-oil-producers-in-2023/>

Which Car, 2024. Which Car. It's 2024, how many cars are there in the world?
 Available at: <https://www.whichcar.com.au/news/how-many-cars-are-there-in-the-world>

Williams, 2024. Nasdaq. Lithium Market Update: Q1 2024 in Review. Available at:
 <https://www.nasdaq.com/articles/lithium-market-update:-q1-2024-in-review>

World Wildlife Fund, 2022. The Future is Circular: The Circular Economy and Critical Minerals for the Green Transition. Available at: chrome-extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3A%2F%2Fwwfint.awsassets.panda.org%2Fdownloads%2Fcircular_economy_and_critical_minerals_report_summary_and_recommendations_1.pdf

Wyloo, 2024. Nickel's Role in the Energy Transition Supporting a Net Zero, Low Carbon Future. Available at: <chrome-extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3A%2F%2Fwyloo.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2024%2F02%2Fwyloo-nickel-fact-sheet-2024.pdf>

Xometry, 2024. Transition Metals: Definition, Properties, Use, and Types. Available at:
 <https://www.xometry.com/resources/materials/transition-metals/>

Yoshiko et al, 2022. Recycling rare earths: Perspectives and recent advances. 21 Abril, Volume 47, p. 283–288. Available at:
 https://www.researchgate.net/publication/360119352_Recycling_rare_earths_Perspectives_and_recent_advances

Yoshino, 2014. Available at:
 https://www.researchgate.net/publication/283442156_Development_of_the_Lithium-Ion_Battery_and_Recent_Technological_Trends2014. Development of the Lithium-Ion Battery and Recent Technological Trends. Em: G. Pistoia, ed. s.l.:Gianfranco Pistoia, pp. 1-20.

Zavahir et al, 2021. A review on lithium recovery using electrochemical capturing systems. Desalination, 500(114883). Available at:
 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916420315617?via%3Dihub>

Zhang et al, 2004. Synthesis and characterization of antimony-doped tin oxide (ATO) nanoparticles by a new hydrothermal method. Materials Chemistry and Physics, Volume 87, pp. 10-13. Available at:
 https://www.researchgate.net/publication/229190762_Synthesis_and_characterization_of_antimony-doped_tin_oxide_ATO_nanoparticles_by_a_new_hydrothermal_method

Zhuang et al, 2015. Recovery of critical metals using biometallurgy. Available at:
 <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4458433/>

Sugestões de leitura complementar

AG Metals, 2024. Pyrometallurgy vs. Hydrometallurgy in Precious Metals Refining. Available at: <https://agmetals.com/hydrometallurgy/>

Alé, 2012. Turbinas eólicas de eixo vertical. Available at: chrome-extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3a%2f%2fapp.eventize.com.br%2fupload%2f000388%2ffiles%2f3_%2520turbinas%2520eolicas%2520de%2520eixo%2520vertical.pdf

Association International Copper, 2021. Copper Recycling. Available at: <chrome-extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3A%2F%2Fcopperalliance.org%2Fwp-content%2Fuploads%2F2022%2F02%2FICA-RecyclingBrief-202201-A4-R2.pdf>

Ancygier et al, 2020. Decarbonisation pathways for the eu power sector. Policy framework, main drivers, case studies, and scenario analysis: lessons learned for alignment with the Paris Agreement, november.

Ants, 2024. Batx Energies. Hydrometallurgical Process for Obtaining Pure Metals Available at: <https://batxenergies.com/hydrometallurgical-process-for-obtaining-pure-metals/>

Britannica, 2024, The Editors of Encyclopaedia. "indium". Encyclopedia Britannica, 5 Mar. 2024. Available at: <https://www.britannica.com/science/indium>

Britannica, 2024. Britannica. Cobalt. Available at: <https://www.britannica.com/science/cobalt-chemical-element>

Cohen, 2024. Everything you need to know about scrap metal recycling. Available at: <https://www.cohenusa.com/blog/everything-you-need-to-know-about-scrap-metal-recycling/>

Center For Sustainable Systems, 2023. University of Michigan. Available at: <https://css.umich.edu/publications/factsheets/material-resources/critical-materials-factsheet>

Davis et al, 2023. Hydrometallurgical recycling technologies for NMC Li-ion battery cathodes: current industrial practice and new R&D trends. 16 Outubro. Available: https://www.researchgate.net/publication/374768841_Hydrometallurgical_recycling_technologies_for_NMC_Li_ion_battery_cathodes_Current_industrial_practice_and_new_RD_developments_trends

Djouani, 2022. Advanced study on the extraction of Nickel from its ores. Research Report] oum el bouaghi university. 2022. hal-03637893. Available: <chrome-extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3A%2F%2Fhal.science%2Fhal-03637893%2Fdocument>

Dishara et al, 2024. The role of nickel (Ni) as a critical metal in clean energy transition: applications, global distribution and occurrences, production-demand and phytomining. Journal of Asian Earth Sciences, 259(105912).

- European Commission, 2018. National long-term strategies
Available at: https://ec.europa.eu/info/energy-climate-change-environment/implementation-eu-countries/energy-and-climate-governance-and-reporting/national-long-term-strategies_en
- Espinosa et al, 2012. Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Handbook.
Available:
https://www.researchgate.net/publication/285444726_Waste_electrical_and_electronic_equipment_WEEE_handbook
- Gibson et al, 2011. Indium and gallium overview. 07 Outubro. Available: chrome-extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3A%2F%2Fwww.edisoninvestmentresearch.com%2Fsectorreports%2FIndiumGalliumOverview071011.pdf
- Griswold, 2019. Driving nickel recovery. Demand for electric vehicle batteries could tax nickel supplies if an efficient recycling system is not established.
Available at: <https://www.recyclingtoday.com/article/driving-nickel-scrap-recovery/>
- Grantham Institute, 2017. Climate Change and the Environment. Available at:
<https://granthaminstitute.com/2017/09/12/what-does-business-as-usual-mean-today/>
- Hussein et al, 2024. Recycling Process of Copper Alloys. Available at:
https://www.researchgate.net/publication/379621504_Recycling_Process_of_Copper_Alloys
- Hayes et al, 2018. Critical minerals: A review of elemental trends in comprehensive criticality studies. Resources Policy, Volume 59, pp. 192-199. Available at:
<https://ideas.repec.org/a/eee/jrpoli/v59y2018icp192-199.html>
- Industry EMEA, 2023. Available at: <https://www.linkedin.com/pulse/lithium-ion-battery-recycling-processes-latest-trends-challenges-35uqf/>
- Ider, 2015. Recapture strategic value chains in the rare earth market. Available:
https://www.researchgate.net/publication/346109177_recapture_strategic_value_chains_in_the_rare_earth_market
- Institute for Energy Research, 2023. Environmental Impacts of Lithium-Ion Batteries
Available at: <https://www.instituteforenergyresearch.org/renewable/environmental-impacts-of-lithium-ion-batteries/>
- Kirsten et al, 2020. Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition. World Bank Group, p. 112. Available at: chrome-extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3A%2F%2Fpubdocs.worldbank.org%2Fen%2F961711588875536384%2FMinerals-for-Climate-Action-The-Mineral-Intensity-of-the-Clean-Energy-Transition.pdf
- Kintek Solution, 2024. Available at: <https://pt.kindle-tech.com/faqs/what-is-the-purpose-of-ito-coating>
- Lee et al, (. S. L. M. N. L., 2020. A Review on Hydrometallurgical Processes for the Recovery of Valuable Metals from Spent Catalysts and Life Cycle Analysis Perspective. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, Volume 42. Available:

https://www.researchgate.net/publication/339354621_A_Review_on_Hydrometallurgical_Processes_for_the_Recovery_of_Valuable_Metals_from_Spent_Catalysts_and_Life_Cycle_Analysis_Perspective

Makuza et al, 2021. Pyrometallurgical options for recycling spent lithium-ion batteries: A comprehensive review. *Journal of Power Sources*, 491(229622). Available at: https://www.researchgate.net/publication/349312947_Pyrometallurgical_options_for_recycling_spent_lithium-ion_batteries_A_comprehensive_review

Murugappan et al, 2021. Microbe-assisted management and recovery of heavy metals from electronic wastes. *Environmental Management of Waste Electrical and Electronic Equipment*, pp (65-88). Available at: https://www.researchgate.net/publication/350984713_Microbe-assisted_management_and_recovery_of_heavy_metals_from_electronic_wastes

Órigo Energia, 2022. Energia eólica: Como funciona uma das maiores fontes de energia renovável. Available at: <https://origoenergia.com.br/blog/energia/energia-eolica/>

Pavoski et al, 2022. Nanotechnology and recycling, remanufacturing, and reusing battery. *Nano Technology for Battery Recycling, Remanufacturing, and Reusing*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/360771760_Nanotechnology_and_recycling_remanufacturing_and_reusing_battery

Pavoski, 2011. Sciencedirect. Pyrometallurgy. Available at: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/pyrometallurgy#:~:text=An%20advantage%20of%20the%20pyrometallurgy,to%20the%20vapors%20%5B59%5D>.

Pan et al, 2023. Pyrometallurgical recycling of spent lithium-ion batteries from conventional roasting to synergistic pyrolysis with organic wastes. *Journal of Energy Chemistry*, Volume 85, pp. 547-561. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2095495623003972>

PCE Internatinal, 2024. Offshore wind foundation protection Available at: <https://www.pce-international.com/offshore-wind-foundation-protection/#:~:text=running%20these%20installations,-,in%202021%2c%20of%20the%20total%20830%20gw%20of%20wind%20capacity,prisent%20in%20just%2019%20countries>.

Rahimpour et al, 2019. The Life Cycle of Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Critical Minerals Recycling: Case of Lithium-ion Batteries. *Procedia CIRP*, Volume 80, pp. 316-321. Available at: https://www.researchgate.net/publication/332862160_The_Life_Cycle_of_Energy_Consumption_and_Greenhouse_Gas_Emissions_from_Critical_Minerals_Recycling_Case_of_Lithium-ion_Batteries

Rahimpour et al, 2019. The Life Cycle of Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Critical Minerals Recycling: Case of Lithium-ion Batteries. *Procedia CIRP*, Volume 80, pp. 316-321. Available at: https://www.researchgate.net/publication/332862160_The_Life_Cycle_of_Energy_Consumption_and_Greenhouse_Gas_Emissions_from_Critical_Minerals_Recycling_Case_of_Lithium-ion_Batteries

sumption_and_Greenhouse_Gas_Emissions_from_Critical_Minerals_Recycling_Case_of_Lithium-ion_Batteries

Rowan, 2023. COP28, Climate Change, and the Global Stocktake, vol.5, Issue 9. October. Available at: chrome-extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3a%2f%2fwww.wellbeingintlstudiesrepository.org%2fcgi%2fviewcontent.cgi%3farticle%3d1163%26context%3dwb

Rahimpour et al, 2022. Environmental benefits of circular economy approach to use of cobalt. Global Environmental Change, 76(102568). Available: https://www.researchgate.net/publication/362034402_Environmental_benefits_of_circular_economy_approach_to_use_of_cobalt

Shuangliang et al, 2023. Global rare earth elements projects: New developments and supply chains. Ore Geology Reviews, 157(105428). Available at: https://www.researchgate.net/publication/369737109_Global_rare_earth_elements_projects_New_developments_and_supply_chains

Sktes, 2023. The difference between hydrometallurgy and pyrometallurgy Available at: <https://www.sktes.com/news/the-difference-between-hydrometallurgy-and-pyrometallurgy#:~:text=Many%20studies%20have%20found%20that,minimal%20air%20emissions%2C%20and%20purification.>

Sharma, 2023. Science Info. Hydrometallurgy: Principles, Processes, Advantages, Disadvantages. Available at: <https://scienceinfo.com/hydrometallurgy-processes-advantages/>

Silva et al, 2019. Avaliação de Custo Benefício da Utilização de Energia Fotovoltaica. Revista de Ciência e Tecnologia. Available at: <https://revista.ufr.br/rct/article/view/5405>

Sojka et al, 2020. Comparative study of Li-ion battery recycling processes. Setembro. Available at: chrome-extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3a%2f%2faccurec.de%2fwp-content%2fuploads%2f2021%2f04%2fAccurec-Comparative-study.pdf

Sonule et al, 2023. Comparative Analysis of Pyrometallurgy, Hydrometallurgy and Bio-Hydrometallurgy for Extraction of Metals from E-Waste. International Journal of Research Publication and Reviews, Outubro. Volume 4. Available at: chrome-extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3a%2f%2fijrpr.com%2fuploads%2fv4ISSUE10%2FIJRPR18339.pdf

Teske et al, 2019. Achieving the Paris Climate Agreement Goals. Global and Regional 100% Renewable Energy Scenarios with Non-energy GHG Pathways for +1.5°C and +2°C, p. 535.

Unacademy, 2024. Electrolytic Refining of Copper. Available at: <https://unacademy.com/content/jee/study-material/chemistry/electrolytic-refining-of-copper/#:~:text=Electrolytic%20refining%20of%20copper%20is,from%20acidified%20copper%20sulphate%20solution.>

United Nations Climate Change, 2024. The Paris Agreement. What is the Paris Agreement? Available at: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>

USGS, 2024. National Minerals Information Center. Available at: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center>

USGS, 2017. Germanium and Indium. Critical Mineral Resources of the United States- Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply. Available at: [chrome-extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3A%2F%2Fpubs.usgs.gov%2Fpp%2F1802%2Fi%2Fpp1802i.pdf](https://pubs.usgs.gov/of/2018/02/germanium-and-indium/)

Woods, 2023. Recycling 'end-of-life' solar panels, wind turbines, is about to be climate tech's big waste business. Available at: <https://www.cnbc.com/2023/05/13/recycling-end-of-life-solar-panel-wind-turbine-is-big-waste-business.html>

Wedrychowicz et al, 2022. Recovery of Non-Ferrous Metals from PCBs Scrap by Liquefaction from Lead. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8953818/#:~:text=The%20disadvantages%20of%20pyrometallurgy%20include,compounds%2C%20tar%2C%20and%20ash.>

Xiaolu et al, 2022. ResearchGate. Available at: https://www.researchgate.net/figure/Comparison-of-hydrometallurgical-pyrometallurgical-and-direct-recycling-processes_tbl1_363408332

Yla-Mella, 2016. Drivers and Constraints of Critical Materials Recycling: The Case of Indium. Available at: <https://www.mdpi.com/2079-9276/5/4/34>