



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Sofia Andrade Florencio

Denise Croce Romano Espinosa

Medidas necessárias para o Brasil estar preparado para reciclar e absorver as baterias gastas de íons de lítio de veículos elétricos e de parques renováveis que chegarem ao fim da vida útil em 30 anos

Trabalho de Conclusão de
Curso em PESQUISA
ACADÊMICA apresentada à
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo
para Graduação no Curso de
Engenharia Química

(Undergraduate Research)

Departamento de Engenharia Química

São Paulo, 2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Florencio, Sofia Andrade

Medidas necessárias para o Brasil estar preparado para reciclar e absorver as baterias gastas de íons de lítio de veículos elétricos e de parques renováveis que chegarem ao fim da vida útil em 30 anos / S. A. Florencio - São Paulo, 2024.

75 p.

Trabalho de Conclusão de Curso - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.
1.Bateria de lítio 2.Regulamentação 3.Reciclagem
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia Química

Agradecimentos

Gostaria de agradecer em primeiro lugar ao David Vasconcelos pelo tempo, energia e paciência ao longo do acompanhamento deste trabalho. Agradeço também à professora Denise Espinosa pela orientação e participação nessa última etapa da minha graduação.

Agradeço aos professores do PQI por todos os anos de ensino e ajuda. Gostaria de agradecer também à equipe de professores da especialização *ENRRES* da Centrale Nantes que, mesmo que indiretamente, teve uma enorme influência na minha escolha de tema para este trabalho e também da área em que escolhi atuar.

Por fim, agradeço à minha família pelo apoio, compreensão e confiança de sempre.

Resumo

Com as questões ambientais relacionadas ao aquecimento global tornando-se cada vez mais proeminentes nas discussões mundiais, os esforços para mitigar esses problemas estão em foco. Uma das áreas-chave de atuação é o desenvolvimento e a adoção de tecnologias mais sustentáveis, onde as baterias desempenham um papel crucial. Tanto na estocagem de energia quanto na alimentação de veículos elétricos, as baterias de íons de lítio são fundamentais para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e promover uma transição energética mais limpa. No entanto, esse avanço vem acompanhado de desafios, e a gestão adequada do ciclo de vida das baterias torna-se uma preocupação crucial à medida que sua produção e uso se expandem. Este trabalho busca discutir um breve panorama geral sobre tecnologias, tendências de consumo e regulamentações relacionadas a baterias de íons de lítio para poder inspirar um conjunto de possíveis medidas para preparar o Brasil para as baterias inservíveis.

Palavras-chave: Baterias de lítio, regulamentação, reciclagem

Abstract

With environmental issues, especially those related to global warming, becoming increasingly prominent in global discussions, efforts to mitigate these problems are in focus. One of the key areas of action is the development and adoption of more sustainable technologies, where batteries play a crucial role. Both in energy storage and in the propulsion of electric vehicles, lithium-ion batteries are fundamental components for reducing greenhouse gas emissions and promoting a cleaner energy transition. However, this advancement does not come without challenges, and proper management of the battery life cycle becomes a crucial concern as their production and usage expand. This work seeks to discuss a brief overview of technologies, consumption trends, and regulations related to lithium-ion batteries to inspire a set of possible measures to prepare Brazil for end-of-life batteries.

Key-words: Lithium-ion batteries, regulations, recycling

Lista de figuras

- Figura 1: Projeção de emissões de gases de efeito estufa (IEA, 2023)
- Figura 2: Emissões de CO₂ por setor (Climate Watch, 2023)
- Figura 3: Emissões de CO₂ evitadas por setor de energia limpa (IEA, 2023)
- Figura 4: Expansão na capacidade de geração anual (IRENA, 2023)
- Figura 5: Distribuição de energias renováveis na capacidade mundial (IEA, 2024)
- Figura 6: Expansão na instalação de energias renováveis em diversos países (IEA, 2023)
- Figura 7: Indicação dos componentes de BESS no interior de um Eletrocentro (WEG, 2023)
- Figura 8: Aplicações de BESS no setor elétrico mundial
- Figura 10: Crescimento de fontes de geração e baterias BESS nos EUA em 2023 (US EIA, 2023)
- Figura 11: Representação visual de arquitetura típica de um EV (AAA, 2019)
- Figura 12: Resultados da Análise do Ciclo de Vida de carros elétricos e à combustão no melhor dos casos EU (Transenv, 2020)
- Figura 13: Resultados da Análise do Ciclo de Vida de carros elétricos e à combustão no pior dos casos EU (Transenv, 2020)
- Figura 14: Crescimento da frota de veículos elétricos mundialmente (BNEF, 2024)
- Figura 15: Programa de redução gradativa das emissões de CO₂ para veículos (CE, 2022)
- Figura 16: Vendas e participação na frota de VEs leves nos EUA (AAI, 2023)
- Figura 17: Esquema de funcionamento de uma bateria (STA, 2022)
- Figura 18: Distribuição de tipos de baterias e características (IEA, 2023)
- Figura 19: Tecnologias de baterias em BESS em operação no mundo (IDTechEx, 2023)
- Figura 20: Demanda de baterias por modo (IEA, 2023)
- Figura 21: Diferentes níveis de criticidade (Helbig et al, 2016)
- Figura 22: Demanda dos materiais necessários às baterias (IEA, 2023)
- Figura 23: Distribuição de reservas de lítio (SGB, 2023)
- Figura 24: Demanda total de lítio no cenário de projetos anunciados (IEA, 2023)
- Figura 25: Distribuição da produção e reservas de cobalto (IFPEN, 2020)
- Figura 26: Demanda total de cobalto no cenário de projetos anunciados (IEA, 2023)
- Figura 27: Distribuição da produção e reservas de níquel (IFPEN, 2020)
- Figura 28: Benefícios de reciclar baterias de íons de lítio (Gaines, 2021)
- Figura 29: Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (ONU, 2015)
- Figura 30: Exemplo de sistema de logística reversa (IBER, 2022)
- Figura 31: Relação de empresas envolvidas na expansão da capacidade mundial de reciclagem de baterias de lítio (IDTechEx, 2023)
- Figura 32: Cronograma de implementação das medidas anunciadas pela nova regulamentação de baterias da UE (União Europeia, 2023)
- Figura 33: Cronograma de implementação das medidas anunciadas pela nova regulamentação de baterias da UE (União Europeia, 2023)
- Figura 34: Projeção da frota de veículos elétricos em 2030 em 3 cenários (Castro et al, 2021)
- Figura 35: Índice de Recolhimento e Destinação de baterias de chumbo-ácido (IBER, 2022)
- Figura 36: Matriz para análise do cenário brasileiro (elaboração da autora, 2024)
- Figura 37: Esquema da atuação do governo na economia circular (Li et al, 2024)

Lista de tabelas

Tabela 1: Projetos Selecionados de BESS e suas características

Tabela 2: Componentes de uma bateria comercial de íon de lítio (Accurec, 2020)

Tabela 3: Mudanças em diversas fases da vida de uma bateria antes e depois das novas regras (UE, 2023)

Tabela 4: Resumo dos objetivos previstos pela regulamentação estadunidense

Tabela 5: Resumo dos desafios, partes interessados e soluções

Lista de abreviaturas e siglas

EIA: Energy Information Association

IPCC: Intergovernmental Panel of Climate Change

CO₂: Dióxido de Carbono

NOAA

CWO: Climate

IRENA: International Renewable Energy Association

ANEEL: Associação Nacional de Energia Elétrica

BESS: Battery Energy Storage System

BMS: Battery Management System

PCS: Power Conversion System

EMS: Energy Management System

AC: Corrente alternada

DC: Corrente contínua

SEP

IRA: Inflation Reduction Act

VE: Veículo Elétrico

EPA

UE: União Europeia

VCI: Veículo a Combustão Interna

ANP: Agência Nacional do Petróleo

Sumário

INTRODUÇÃO.....	4
REVISÃO DA LITERATURA.....	4
Mudança climática e transição energética.....	4
Energias Renováveis e Estocagem.....	8
Veículos Elétricos.....	16
China.....	20
Europa.....	21
Estados Unidos.....	23
Brasil.....	24
Baterias.....	26
Minerais críticos.....	31
Lítio.....	33
Cobalto.....	35
Níquel.....	37
Reciclagem.....	40
Economia circular.....	40
Processos de reciclagem.....	42
Pirometalurgia:.....	43
Hidrometalurgia:.....	43
Legislação.....	46
Resumo.....	51
DISCUSSÃO.....	52
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	57
REFERÊNCIAS.....	59

REVISÃO DA LITERATURA

Mudança climática e transição energética

A sociedade humana tem sofrido, ao longo das últimas décadas, uma transformação constante, com a evolução nas infra-estruturas, na construção e na industrialização. Este movimento tem sido acompanhado por um intenso aumento na necessidade energética, representando um aumento de 68% entre os anos de 1990 e 2021 (IEA, 2022). Para suprir esta demanda, houve um aumento da dependência de combustíveis fósseis, como o petróleo, o carvão e o gás. Estes combustíveis emitem gases de efeito estufa, como o CO₂, que intensificam o efeito estufa na Terra levando a um aquecimento global. Fenômenos climáticos extremos, como aumento da frequência de tempestades tropicais, períodos de seca e temperaturas excessivamente elevadas, têm um impacto direto na população, nas atividades econômicas e na biodiversidade (IPCC, 2022). O aquecimento global causa um aumento de 0,2°C a cada 10 anos e as emissões de CO₂ precisam diminuir em 45% até 2030, em comparação com os níveis de 2010, para que o aumento nas temperaturas mundiais siga abaixo de 1,5°C, evitando catástrofes ambientais e climáticas (IPCC, 2022).

As fontes tradicionais de energia, principalmente baseadas em combustíveis fósseis, são responsáveis por uma parcela significativa das emissões de gases de efeito estufa e contribuem diretamente para o aumento das temperaturas globais. A discussão envolvendo a substituição do uso de combustíveis fósseis por fontes de ciclo de carbono fechado (fontes ditas limpas) vem sendo cada vez mais relevante e necessária, visto que os níveis atmosféricos de CO₂ continuam aumentando. A concentração atmosférica de CO₂ atingiu uma média de 417,2 partes por milhão em 2022, mais de 50% acima dos níveis pré-industriais (NOAA, 2022). Se o nível atual de emissões persistir, existe uma chance de 50% de que o aquecimento global de 1,5°C seja superado em nove anos, o que mostra uma tendência oposta à necessária para reverter as mudanças climáticas (NOAA, 2022).

A curva projetada de emissões de gases de efeito estufa, considerando um cenário de manutenção das políticas implementadas atualmente, não permite limitar o aquecimento global como seria necessário (Figura 1). Pelo contrário, apenas com políticas implementadas até o ano de 2023, a tendência é que as emissões de gases de efeito estufa continuem aumentando. É neste contexto que uma transição energética revelou-se necessária, isto é, passar de uma matriz energética que utiliza combustíveis fósseis para fontes renováveis.

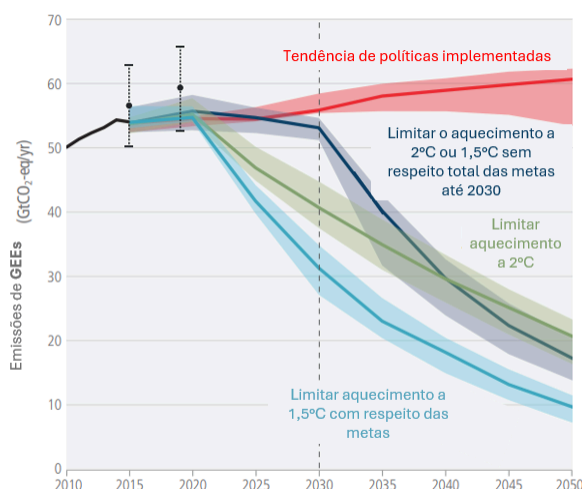


Figura 1: Projeção de emissões de gases de efeito estufa (IEA, 2023)

O setor de energia é de longe o maior responsável pelas emissões de gases de efeito estufa e, por essa razão, não se pode falar em luta contra o aquecimento global sem falar deste setor (IEA, 2023). No ano de 2020, o setor de energia (incluindo geração de eletricidade e calor, usos finais em edifícios, transporte e fabricação, e construção) gerou 74% das emissões de gases de efeito estufa (CWO, 2020). A Figura 2 apresenta as emissões de CO₂ de 2020 divididas em participações de diversas áreas da economia, mostrando que o setor de eletricidade e aquecimento é o que mais emite CO₂ no mundo, seguido do setor de transporte (CWO, 2023).

Por isso, um outro pilar importante para a transição energética e redução das emissões de gases de efeito estufa é uma mudança no setor de transporte, que desempenha um papel crucial nas emissões globais de dióxido de carbono (IEA, 2023).

O setor de transporte é responsável por quase 20% das emissões de CO₂ anualmente (Figura 2), dos quais 75% vem do transporte rodoviário (Ritchie, 2020). Isso significa que 15% de todas as emissões de gás de efeito estufa na atmosfera estão associadas a carros, ônibus e caminhões. Por isso, torna-se evidente que a descarbonização do setor de transportes é fundamental para a transição energética e consequente redução de emissões.

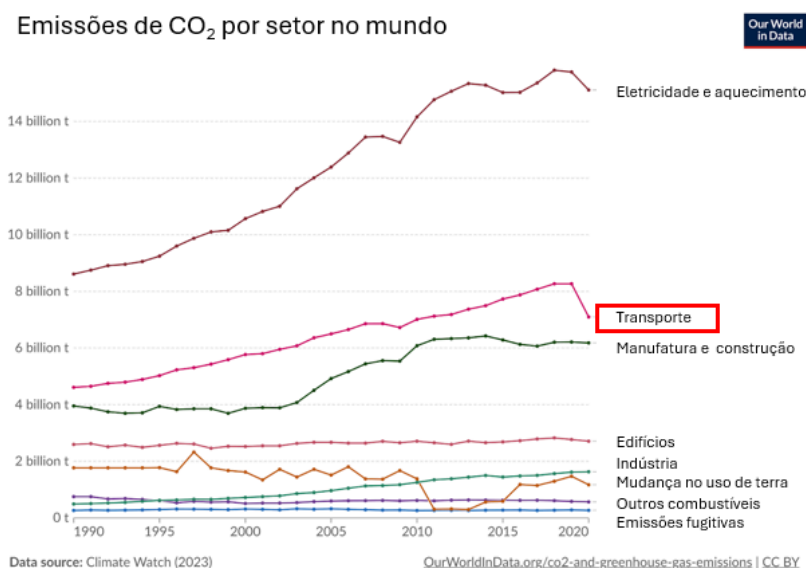


Figura 2: Emissões de CO₂ por setor (Climate Watch, 2023)

Para reduzir as emissões e evitar uma crise climática, o Acordo de Paris, um tratado internacional, foi assinado por 196 países (Zanfer, 2022). Este tratado atesta o compromisso de manter o aumento da temperatura média global abaixo de 2°C em relação aos níveis pré-industriais e fazer esforços para limitar este aumento a 1,5°C acima desses níveis (MCTIC, 2021). Para que isso seja possível, é necessário um aumento de três vezes na capacidade atual de energias renováveis, aumentar a eficiência energética e a eletrificação de diversos setores e diminuir as emissões de metano (IEA, 2023).

O crescimento da implantação de energias limpas e veículos elétricos está diretamente relacionado com uma redução nas emissões de CO₂ (IPCC, 2023). Se as taxas de crescimento atuais da implantação de energias renováveis e da frota de

veículos elétricos se mantivessem constantes até 2030, já seria observado um achatamento na curva de emissões (IEA, 2023). Como se observa na (Figura 3), projeta-se que o solar fotovoltaico pode reduzir as emissões em volta de 3 Gt, eólicas de 2 Gt e carros elétricos 1 Gt adicional em 2030. Sendo assim, neste cenário, seria possível atingir novamente as 35 Gt CO₂, voltando-se ao valor atmosférico de 2015 (Figura 3). No gráfico, nota-se uma queda no ano de 2020, justificada pela pandemia do COVID-19, período no qual houve uma redução generalizada nas emissões de CO₂ devido aos movimentos globais de isolamento (Ronaghi, 2023).

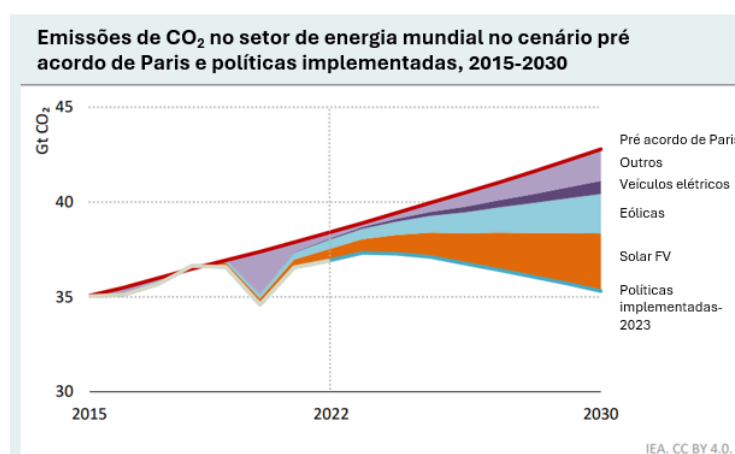


Figura 3: Emissões de CO₂ evitadas por setor de energia limpa (IEA, 2023)

Energias Renováveis e Estocagem

Energias renováveis, tais como solar, eólica, hidrelétrica, biomassa e geotérmica, derivam de recursos naturais não esgotáveis e não emitem gases de efeito estufa durante a produção de energia. Essas fontes renováveis desempenham um papel crucial na redução das emissões de CO₂ e outros poluentes. Ao contrário dos combustíveis fósseis, as energias de fontes renováveis não emitem CO₂ durante a geração e possuem uma alta vida útil, com instalações que podem durar 20 a 30 anos (IRENA, 2023). Outra vantagem proporcionada pelas energias renováveis é a diversificação da matriz energética. A dependência excessiva de fontes não renováveis torna as economias vulneráveis a flutuações nos preços dos combustíveis fósseis,

como, por exemplo, observado na alta de até 56% no preço do gás natural devido à instabilidade relacionada à Guerra na Ucrânia em 2022 (Zhang, 2024).

Na última década, houve uma expansão nas instalações renováveis. Desde 2012, o aumento da matriz energética é maior para energias renováveis que combustíveis fósseis, com destaque para 2022 quando o crescimento das fontes renováveis representou 83% do aumento da matriz energética mundial (Figura 4). Esse aumento pode indicar uma priorização da transição energética, mostrando uma intenção crescente em se desvencilhar da dependência de combustíveis fósseis.

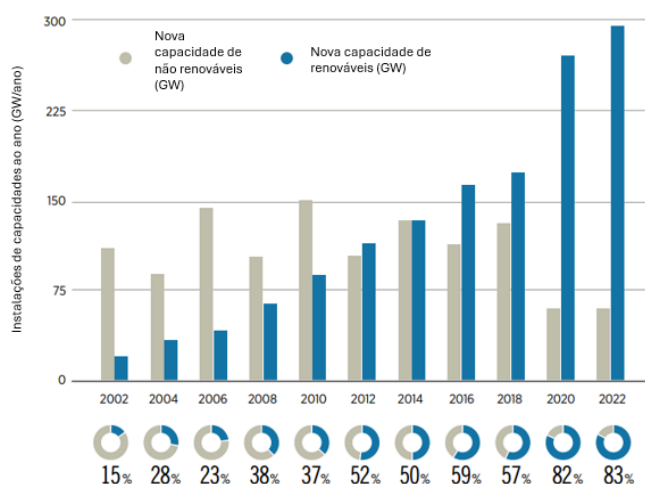


Figura 4: Expansão na capacidade de geração anual (IRENA, 2023)

Dessa crescente evolução, destaca-se principalmente a solar e eólica, que representaram, respectivamente, 30% e 25% da capacidade acumulada total de energia renovável em 2022 (IEA, 2024). A Figura 5 mostra a evolução da capacidade instalada de energias limpas no mundo, sendo a partir de 2012 o início do crescimento exponencial de energias renováveis de fonte solar e eólica. A capacidade adicionada de instalações renováveis em 2023 foi 50% maior que em 2022 (IEA, 2024), o que indica que a tendência permanece crescente.

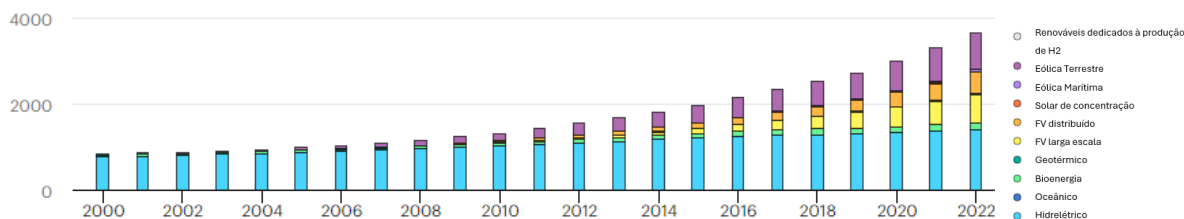


Figura 5: Distribuição de energias renováveis na capacidade mundial (IEA, 2024)

A projeção é de que a expansão das energias renováveis continue crescendo ao redor do mundo, como mostra a figura 6. Entre os anos de 2023 e 2028, espera-se um crescimento acelerado das energias renováveis principalmente na China, União Europeia e Estados Unidos (IEA, 2023). Nota-se também na figura 6 um crescimento nos países em desenvolvimento como os da América Latina e Índia que, embora partindo de uma base histórica de capacidade menor, deverão também participar da transição às energias limpas.

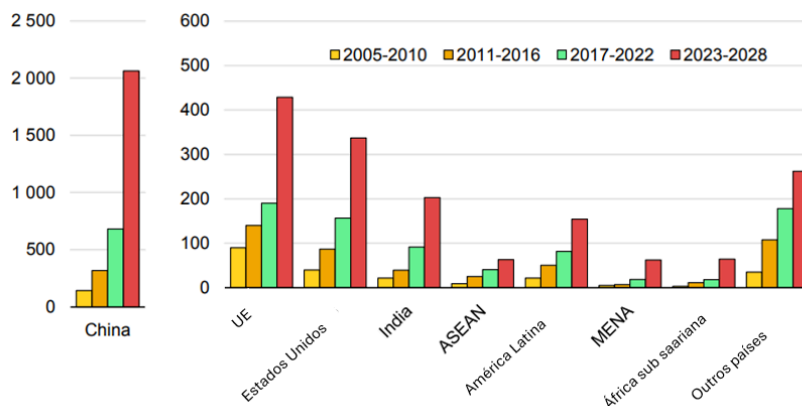


Figura 6: Expansão na instalação de energias renováveis em diversos países (IEA, 2023)

A expansão das energias renováveis mundialmente, embora necessária e em concordância com os objetivos de emissões *net zero* (emissões líquidas zero) até o ano de 2050, apresenta alguns desafios (IEA, 2023). A rápida implantação de energias renováveis variáveis (com fontes intermitentes) aumenta os problemas de integração e infraestrutura. A participação da energia solar fotovoltaica e eólica na geração global de

eletricidade deve dobrar para 25% em 2028 seguindo o cenário mais conservador, o que causa instabilidade e intermitência na rede elétrica mundial (IEA, 2023).

Esta expansão nos próximos anos terá implicações nos sistemas de energia elétrica em todo o mundo. Os sistemas elétricos de potência passarão por transformações significativas, dentre elas o aumento de fontes intermitentes distribuídas no *grid* e a redução da participação de usinas térmicas com reservatórios de capacidade regularizadora (ANEEL, 2024). Como consequência, aparecem oscilações regulatórias, mudanças nos papéis dos agentes do setor e aumento da complexidade de planejamento da operação. Neste contexto, gargalos na rede serão desafios significativos e levarão a um aumento na limitação de energia em muitos países, já que a expansão da rede da forma tradicional não parece acompanhar a instalação acelerada de energias renováveis variáveis (IEA, 2023). Tais gargalos na rede podem gerar filas no momento de conexão dos parques renováveis nas redes elétricas, que ocasiona atrasos na transição. Além disso, estes gargalos estão associados ao *curtailment*, um termo usado no contexto de energia para se referir à prática de reduzir ou interromper a produção de energia de fontes renováveis variáveis devido à falta de capacidade na rede elétrica para absorver toda a energia gerada (Acende, 2023). Isso pode acontecer quando a implantação de novos sistemas de geração de energia conectam-se ao *grid* de maneira mais rápida que a infraestrutura e capacidade de distribuição e transmissão evoluem.

Uma possível solução para este desafio é a instalação de baterias no sistema de rede elétrico. Os sistemas de armazenamento de energia por baterias, do inglês *Battery Energy Storage System (BESS)*, vêm ganhando importância nos sistemas elétricos de potência. As baterias utilizadas na rede (*grid-scale BESS*) são tipicamente empregadas para balanceamento da carga/estocagem de energia em intervalos sub-horários, horários e diários.

Um projeto *BESS* é composto dos seguintes componentes principais:

- Banco de baterias
- Sistema de Monitoramento de Baterias (BMS, *Battery Management System*)

- Sistema de Conversão de Potência (PCS, *Power Conversion System*)
- Sistema de Gerenciamento de Energia (EMS, *Energy Management System*)
- Componentes auxiliares, tais como: sensores e extintores de incêndio.

Com base na Figura 7, são descritos a seguir cada componente de um projeto BESS.

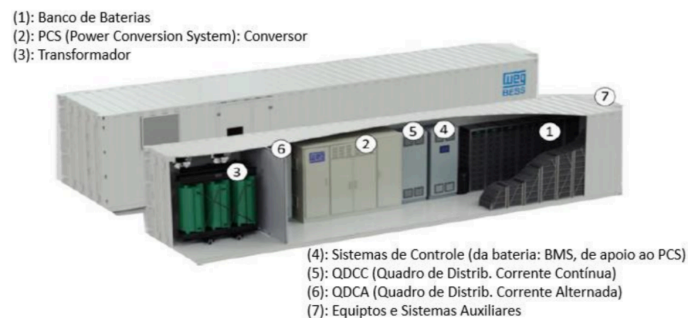


Figura 7: Indicação dos componentes de BESS no interior de um Eletrocentro (WEG, 2023)

O Banco de Baterias (componente 1) contém as células da bateria que são elementos capazes de, por meio de reações químicas, armazenar energia elétrica possibilitando a carga e descarga conforme necessário.

O conversor de potência PCS (*Power Conversion System*), componente 2, é um inversor eletrônico de tensão utilizado em sistemas fotovoltaicos e geradores eólicos, para converter corrente contínua (DC) em corrente alternada (AC). Geralmente, a saída de corrente alternada é de baixa tensão (380-800 V). Para conectar o BESS a sistemas de distribuição e transmissão em tensões mais altas, é necessário um transformador de potência específico (componente 3). O PCS deve garantir o equilíbrio da potência ativa entre a rede e o banco de baterias de forma contínua, de acordo com seu modo de operação, mantendo a estabilidade da tensão e da frequência da rede nos momentos de intermitência da geração de energia.

Os sistemas de controle (componente 4) garantem a operação otimizada e segura do equipamento, mantendo a estabilidade independentemente do modo de operação (carregamento ou descarga). O BMS (*Battery Management System*) é uma das partes do sistema de controle, monitorando parâmetros como tensão, corrente e temperatura. A principal função do BMS é monitorar e proteger o sistema para que

esses limites não sejam ultrapassados, o que poderia causar danos ao sistema ou até mesmo ao meio ambiente, como chamas e vazamento de elementos químicos.

Os componentes 5 e 6 são os quadros de distribuição de corrente contínua e corrente alternada, respectivamente. O sistema de detecção e detecção de incêndio (componente 7) incluem o sistema de aquecimento, ventilação e ar-condicionado, conhecido pela sigla em inglês HVAC (*Heating, Ventilating and Air Conditioning*), e são responsáveis por garantir que a temperatura e a umidade dentro do gabinete do BESS atendam aos parâmetros especificados pelos fabricantes de todos os componentes.

Os projetos envolvendo baterias *BESS* podem ter diferentes objetivos, como regulação e controle de tensão e frequência, redução de picos de demanda, back-up, arbitragem e compensação da variabilidade de geração eólica e solar, gerenciamento de energia, equilíbrio de carga e estabilização da rede (Silva, 2022). Essas aplicações podem ser tanto na rede de transmissão ou de distribuição. A Figura 8 apresenta a distribuição das diversas aplicações de acordo com o sistema do setor elétrico, baseado em projetos disponíveis no laboratório Sandia, do governo dos Estados Unidos, em 2022. Observa-se que a maioria dos casos de aplicação envolvem arbitragem, isto é, venda de energia elétrica em momentos de pico de demanda (em que os preços estão mais altos) e armazenamento em momentos de baixa demanda. Em segundo lugar, aparece a aplicação voltada à estabilidade da rede com adição de fontes renováveis.



Figura 8: Aplicações de BESS no setor elétrico mundial (Silva, 2022)

A aplicação de baterias no fornecimento de serviços ancilares (que complementam o serviço da rede) está bem disseminada e avançada em muitos países da Europa, nos Estados Unidos e Austrália e vão além do controle de frequência, sendo utilizadas também para restabelecimento autônomo de usinas (*black start*), sistemas especiais de proteção (SEP) e controle de tensão (reativos) de sistemas de transmissão (Silva, 2022).

O maior volume de baterias em escala de rede (*grid-scale*) foi instalado nos últimos seis anos (IEA, 2023). A comparação entre o final do ano de 2021 e 2022 indica crescimento de mais de 75% no acréscimo de capacidade instalada total, de 11 GW em 2022 (Oliveira e Barbosa, 2022). A maior parte dos projetos instalados de *BESS* em 2022 foi na China e nos EUA, como indicado na Figura 9.

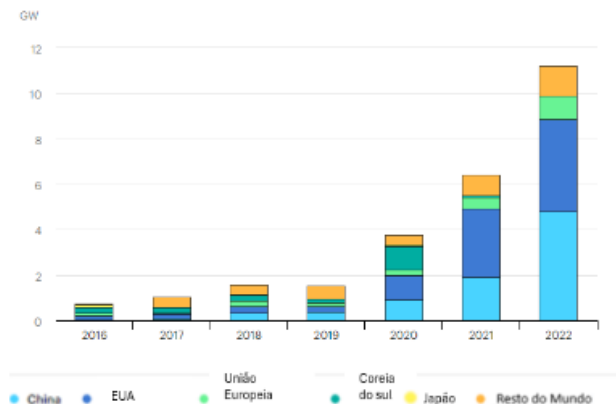


Figura 9: Acréscimo Anual da Capacidade Instalada de BESS (GW) (IEA, 2023)

A Figura 10 apresenta o crescimento das baterias BESS nos EUA, onde a capacidade alcançou 9,4 GW em 2023, o que supera a capacidade prevista para plantas térmicas a gás natural (7,5 GW) e energia eólica (6,0 GW). A expansão prevista da geração solar fotovoltaica é também significativa, de 29,1 GW (US EIA, 2023). A Lei de Redução da Inflação (IRA) dos Estados Unidos, aprovada em agosto de 2022, inclui um crédito fiscal para investimentos em armazenamento independente, o que se espera impulsionar a competitividade de novos projetos de armazenamento em grande escala na rede (IEA, 2023).

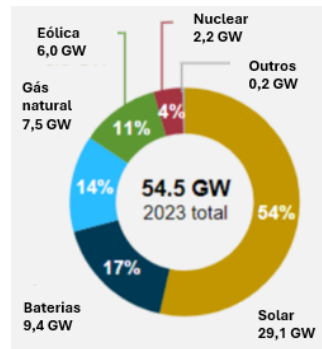


Figura 10: Crescimento de fontes de geração e baterias BESS nos EUA em 2023 (US EIA, 2023)

A China foi o país com maior crescimento na capacidade de estocagem de energia com baterias a escala de grid, com um total de 5 GW adicionados no ano de 2022 (IEA, 2023). Isso se deve principalmente ao Projeto de Promoção de Energia Renovável e Armazenamento em Bateria, uma medida pública chinesa que tem como objetivo viabilizar a integração e o uso de energia renovável por meio da implementação de sistemas de armazenamento de bateria (*BESS*) e aplicações inovadoras. No modelo proposto, diversos projetos que envolvem armazenamento de energia por meio de baterias de grande porte poderão ser financiados com empréstimos competitivos do banco Huaxia.

A União Europeia também tem apresentado uma rápida expansão em projetos de bateria, principalmente ligados a projetos de energia renovável. Em março de 2023, a Comissão Europeia publicou uma série de recomendações sobre armazenamento de energia, delineando ações políticas que ajudariam a garantir uma maior implantação de armazenamento de eletricidade na União Europeia (IEA, 2023).

Já no Brasil, embora de escala relativamente menor, há registro de diversos projetos de baterias sendo instalados, muitos dos quais associados a projetos de P&D vinculados a investimentos da ANEEL em 2016 (ANEEL, 2019). Uma seleção desses projetos é indicada na Tabela 1, que evidencia a variedade de tecnologias testadas (lítio principalmente, e chumbo-ácido), em acoplamento à fonte de geração fotovoltaica, em sua maioria, e também eólica e hidrelétrica.

Uma vez apresentado o funcionamento e a importância de sistemas de estocagem de energia associados a parques de energia renováveis, apresenta-se a seguir uma tabela com exemplos de projetos e seus respectivos objetivos e status ao redor do mundo e no Brasil.

Tabela 1: Projetos Selecionados de *BESS* e suas características

Localização	BESS	Fonte de ENR	Finalidade	Status	Referência
Moss Landing / California, EUA	Li-ion 1600 MWh	Solar fotovoltaico	Armazenamento de energia renovável solar	Em operação	Sandia Lab, 2022
Gateway / California, EUA	Li-ion 250 MWh	Solar fotovoltaico	Atendimento de pico e carregamento via solar durante o dia	Em operação	Sandia Lab, 2022
Lancaster / California, EUA	Li-ion 508 MWh	Solar fotovoltaico	Fortalecimento da rede da Califórnia com descarga em períodos de pico e carregamento com planta PV	Em operação	Sandia Lab, 2022
Kyon energy, Alemanha, UE	Li-ion 200 MWh	Eólica	Estocagem da energia em momentos de baixa demanda	Projeto aprovado	Murray, 2023
HEIT, Reino unido, Europa	Li-ion 196 MWh	Solar fotovoltaico	Estocagem da energia em momentos de baixa demanda	Em operação	Energy institute, 2023
Baotang, China	Li-ion 600MWh	Solar fotovoltaico e eólica	Estocagem da energia em momentos de baixa demanda	Em operação	CGTN, 2024
Dalian, China	Fluxo redox ion 400 MWh	Não associado diretamente	Melhorar a confiabilidade e a estabilidade da rede elétrica, gestão de carga e fornecer serviços de regulação de frequência	Em operação	CNESA, 2022
Golmudi, China	Li-ion 100 MWh	Solar fotovoltaico, solar concentrada e eólica	Regulação de frequência, rampa de potência, e deslocamento temporal de energia renovável	Em operação	ESD, 2019
Vale / Ilha Guaíba, RJ, Brasil	Li-ion 10 MWh	Hidrelétrica	Redução no custo da energia em momentos de pico e liberação de capacidade para rede elétrica local	Em operação	GREENER, 2021
P&D CEMIG/	Li-ion	Solar	Armazenamento de energia	Em	LEITE, 2019

Belo Horizonte, MG, Brasil	1MWh Chumbo-ácido 750 kWh	fotovoltaico	solar e desenvolvimento em momentos de alta demanda	projeto	
CPFL / Campinas, SP, Brasil	Li-ion 2 MWh	Solar fotovoltaico	Fortalecimento da rede com descarga em períodos de pico e carregamento com planta PV	Em operação	RIBOLDI, 2020
CHESF / Casa Nova, BA, Brasil	Li-ion 1MWh	Solar fotovoltaico e eólica	Fortalecimento da rede com descarga em períodos de pico e carregamento com planta PV e turbinas eólicas	Em operação	CHESF, 2020

Veículos Elétricos

No setor de transporte, os veículos elétricos (VEs) surgiram como uma alternativa mais limpa por não emitirem gases de efeito estufa durante o uso (EPA, 2021). Os VEs funcionam através de motores elétricos que convertem energia elétrica em energia mecânica. O inversor é responsável por converter a energia elétrica de corrente contínua (DC) armazenada nas baterias em corrente alternada (AC) para alimentar o motor do veículo. Além disso, os veículos elétricos costumam ter sistemas de transmissão de velocidade única devido à capacidade do motor elétrico de operar eficientemente em um amplo espectro de rotações, fornecendo torque de forma consistente. Isso elimina a necessidade de uma caixa de câmbio com múltiplas marchas, comum nos veículos a combustão, o que simplifica o trem de força e reduz a manutenção (EDF, 2020). Os principais componentes de um VE são apresentados na figura 11.

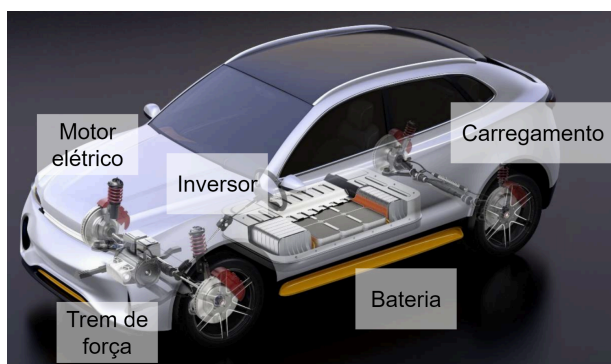


Figura 11: Representação visual de arquitetura típica de um EV (AAA, 2019)

Os carros convencionais dependem da queima de combustíveis fósseis para gerar movimento e essa combustão libera não só CO₂, mas também uma variedade de outros poluentes nocivos, como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NOx), hidrocarbonetos e partículas finas. Estes gases contribuem para a poluição do ar, problemas de saúde pública e são contribuintes para as mudanças climáticas (ONU, 2020).

Os VEs, por outro lado, não envolvem uma combustão e, portanto, não produzem essas emissões nocivas ao meio ambiente durante sua utilização. Motores elétricos são particularmente eficientes na conversão de energia em movimento, e essa eficiência é ainda maior na condução urbana, em que ocorrem paradas e partidas frequentes. Além disso, os VEs podem se beneficiar da frenagem regenerativa (*regenerative braking*), um processo que recupera parte da energia durante a frenagem e a retorna para a bateria (DOE, 2021).

Um outro ponto chave na discussão sobre VEs é a fonte de sua eletricidade. Como os carros são alimentados pela energia elétrica, é fundamental que a matriz energética do local de carregamento seja de baixa emissão de carbono para que o VE tenha uma baixa pegada de carbono. Por exemplo, na Suécia, um país com geração de eletricidade com baixa pegada de carbono devido à presença de usinas hidrelétricas e nucleares (Colab, 2023), um carro elétrico com bateria proveniente da Suécia e produzido na União Europeia emite 81% menos que um carro com motor a combustão interna (ICE), como mostra a figura (Transenv, 2020). A figura 12 mostra que um carro com motor a combustão interna produzido na UE emite por volta de 250 gCO₂/km ao longo de seu ciclo de vida, enquanto um VE com bateria sueca e produção europeia, emite menos de 50 gCO₂/km.

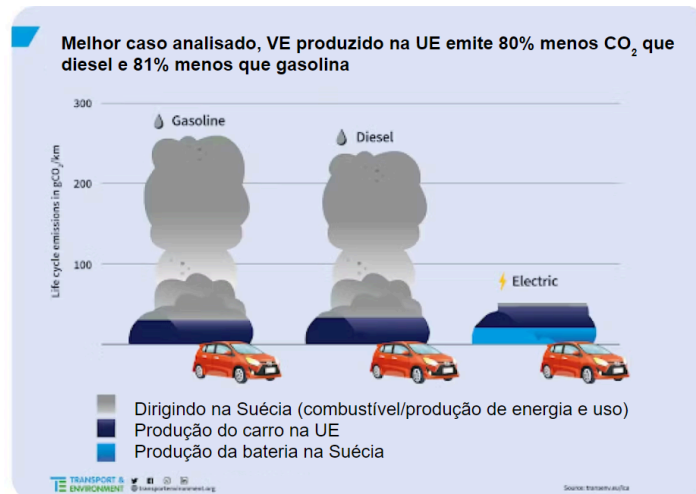


Figura 12: Resultados da Análise do Ciclo de Vida de carros elétricos e à combustão no melhor dos casos EU (Transenv, 2020)

No entanto, mesmo no pior dos casos, como a Polônia, que é muito dependente de combustíveis fósseis (IEA, 2022), a análise de ciclo de vida revelou que a pegada de carbono de um carro elétrico segue 28% mais baixa que de carros movidos à gasolina (Transenv, 2020). Neste caso, a figura 13 mostra que um VE produzido na UE com bateria chinesa emite em torno de 180 gCO₂/km em seu ciclo de vida, que segue menor que o carro com motor a combustão interna produzido na UE, que emite por volta de 250 gCO₂/km.

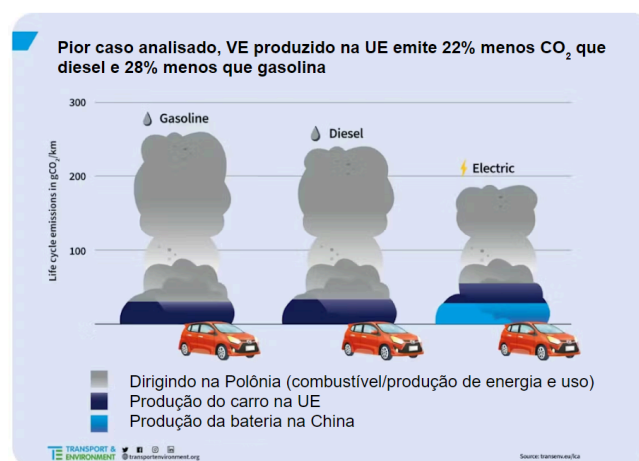


Figura 13: Resultados da Análise do Ciclo de Vida de carros elétricos e à combustão no pior dos casos EU (Transenv, 2020)

Os VEs possuem a desvantagem da autonomia limitada no modo 100% elétrico, sendo ela menor que a de carros VCI (Veículo a combustão interna) com a tecnologia atual de baterias. Adicionado a isso, o alto tempo necessário para carregar as baterias prejudica a aplicação de VEs em longas viagens (Costa, 2019). Por isso, o carregamento dos veículos elétricos é um tópico relevante à análise, sendo subdividido em níveis, de acordo com o tipo de carregamento.

O carregamento de Nível 1 é o mais básico e lento, utilizando uma tomada residencial padrão de 110-240V. Este tipo de carregamento é frequentemente usado em casa e pode levar de 8 a 24 horas para carregar completamente a bateria de um VE, dependendo da capacidade da bateria e do veículo. O carregamento rápido, também conhecido como Nível 3 ou carregamento de Corrente Contínua (DC), é o método mais rápido disponível, utilizando tensões mais altas (acima de 400V) e pode carregar um VE até 80% de sua capacidade em apenas 30 minutos (Tesla, 2024). Este tipo de carregamento é ideal para viagens longas, pois permite que os motoristas façam pausas curtas para recarregar rapidamente seus veículos em rodovias ou locais de carregamento rápido. No entanto, o carregamento rápido requer equipamentos mais complexos e caros e depende da infraestrutura pública do país.

O mercado de carros elétricos está crescendo de forma exponencial, com mais de 10 milhões de vendas em 2022. No mesmo ano, 14% dos carros novos vendidos foram elétricos, em comparação a 5% em 2020 (IEA, 2023). As vendas de carros elétricos aumentam exponencialmente a cada ano (Figura 14). Em 2022, havia um total de 26 milhões de veículos elétricos em circulação, o que representa um aumento de 60% com relação ao ano anterior. Estudos da BloombergNEF (2024) estimam uma venda total de 14 milhões de VEs em 2023 no mundo todo, totalizando uma frota de 40 milhões de VEs rodando no último ano. Na figura 14, observa-se um crescimento significativo nas vendas de VEs - de 2022 para 2023 houve um aumento de 34% e de 2023 para 2024, espera-se um aumento de 19% (BNEF, 2024). Os mercados com maior volume de VEs são o chinês, com mais da metade da frota mundial, o europeu e o norte americano (IEA, 2023).

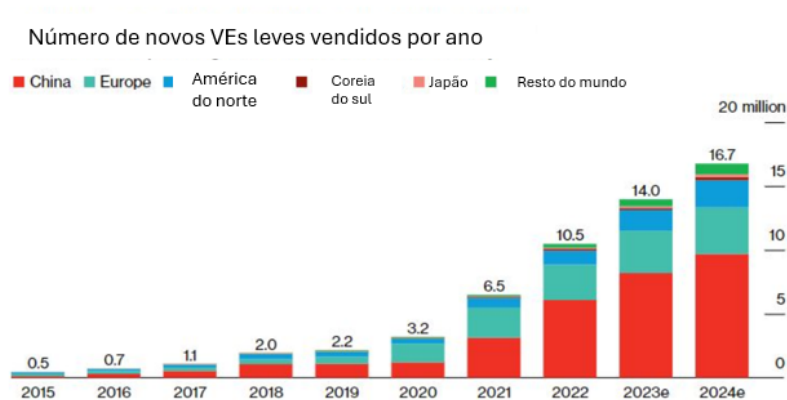


Figura 14: Crescimento da frota de veículos elétricos mundialmente (BNEF, 2024)

China

A República Popular da China representa o maior mercado de VEs no mundo, sendo responsável por quase 60% de todos os novos registros de carros elétricos mundialmente em 2022 e mais da metade de todos os carros elétricos nas estradas do mundo, totalizando uma frota de 13,8 milhões (IEA, 2023). Este impulso para os veículos elétricos na China é o resultado de mais de uma década de políticas de apoio direcionadas, incluindo a isenção fiscal de VEs, o desenvolvimento de infraestrutura de carregamento e políticas rigorosas para carros à combustão (MIT, 2023). Ao todo, o governo chinês investiu mais de 29 bilhões de dólares em subsídios e incentivos fiscais entre 2009 e 2022 (IPEA, 2022). Além disso, o tempo de expedição e custo do emplacamento de veículos convencionais é muito mais alto do que os mesmos indicadores para VEs (Bloomberg, 2023). Essas medidas foram prorrogadas por mais 4 anos e estarão em vigor até 2027, o que deve fortalecer ainda mais o mercado de VEs chinês (Bloomberg, 2023).

Em 2022, a participação dos carros elétricos nas vendas totais de automóveis na China atingiu 29%, ultrapassando a meta nacional de 2025 de uma participação de 20% antes do previsto (IEA, 2023). Além disso, a infraestrutura de recarga para veículos elétricos na China também viu um crescimento significativo. Em 2022, o país dobrou o número de pontos de carregamento de baterias de VEs, alcançando 5,2

milhões de pontos. Destes, 3,4 milhões são pontos de recarga privados, enquanto 1,8 milhão são postos públicos (NEA, 2023).

A China está caminhando para alcançar uma participação de vendas de 50% para VEs até 2030 e também se mostrando como um modelo para a eletrificação do transporte, o que poderá influenciar globalmente a indústria automotiva e esforços de sustentabilidade (IEA, 2023).

Europa

O Conselho Europeu, por meio de seu parlamento, elaborou um conjunto de medidas visando alterar a legislação europeia e garantir uma redução de 55% das emissões de CO₂ até o ano de 2030 (União Europeia, 2023). Em relação ao setor de transporte, existem limites estabelecidos para a quantidade de CO₂ que pode ser emitida por novos veículos por quilômetro, que segue uma redução gradativa até 2035 (União Europeia, 2023). Até o ano de 2024, é permitido até 95 g/km de CO₂ para carros de passageiros e 147 g/km para veículos comerciais leves (Figura 15). Após 2025, esses valores serão reduzidos em 15% até 2029 e em 55% adicionais em 2030 até 2035. A partir de 2035, a venda de veículos a combustão será proibida na UE (União Europeia, 2023).

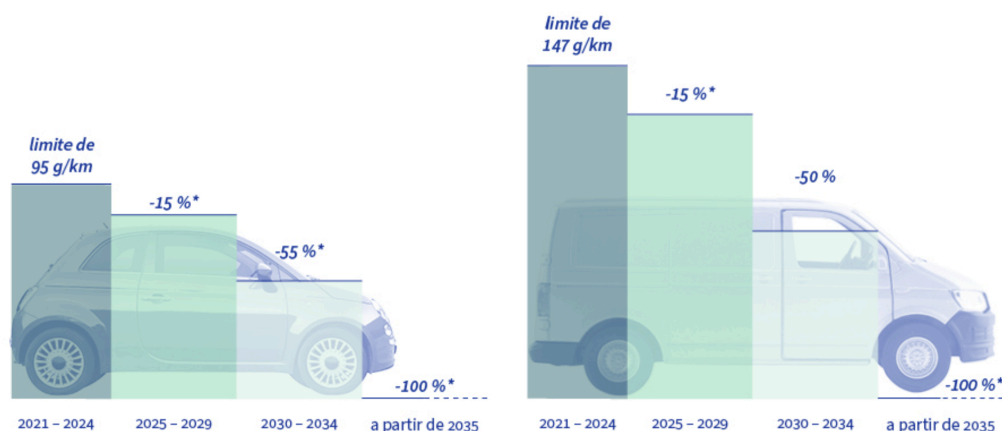


Figura 15: Programa de redução gradativa das emissões de CO₂ para veículos (CE, 2022)

Na Europa, as vendas de carros elétricos aumentaram mais de 15% em 2022 em comparação com 2021, alcançando 2,7 milhões de unidades (IEA, 2023). Este número representa uma redução no crescimento quando comparado ao ano de 2021, efeito de uma contração geral do mercado automobilístico, com as vendas totais de carros na Europa caindo mais de 4% em 2022 em relação a 2021 (ACEA, 2022).

Mesmo assim, Europa permaneceu como o segundo maior mercado mundial para carros elétricos após a China em 2022, representando 25% de todas as vendas de carros elétricos e 30% do estoque global (IEA, 2023). A participação de vendas de carros elétricos atingiu 21%, com países europeus continuando a liderar em participação de vendas de carros elétricos, destacando-se Noruega com 88%, Suécia com 54% e Alemanha como o maior mercado em termos de volume.

A Noruega se destaca como o país com maior porcentagem de veículos elétricos, sendo um exemplo mundial de políticas de incentivos aos VEs. Esse sucesso deve-se a uma política governamental que promove os VEs desde a década de 1990, com o objetivo de eliminar VCI até 2025. Incentivos financeiros significativos, isenções fiscais e benefícios como estacionamento gratuito e uso de faixas de ônibus foram medidas adotadas pelo país (Jaeger, 2023). Além disso, investimentos substanciais em infraestrutura de carregamento garantiram a Noruega como líder global em carregadores públicos rápidos per capita com a introdução do “direito ao carregamento” em 2017, que garante a pessoas morando em apartamentos carregar seus veículos elétricos com carregadores nível 3 (ELBIL, 2022).

Até 2035, projeta-se que a Europa terá cerca de 130 milhões de carros elétricos nas estradas, representando cerca de 50% do total de veículos (EY, 2023). Para possibilitar este crescimento e o cumprimento das metas propostas pelo parlamento europeu, a Europa precisará aumentar drasticamente a infraestrutura de pontos públicos de carregamento rápido.

Estados Unidos

O *Inflation Reduction Act* (IRA - Lei da Redução da Inflação), é um conjunto de medidas aprovado nos Estados Unidos em agosto de 2022, destinado a abordar questões incluindo mudanças climáticas, energia limpa, saúde e redução da inflação. Para o setor de transportes, o IRA tem como objetivo acelerar a adoção de VEs por meio de incentivos financeiros para consumidores e investimentos em infraestrutura. A lei apresenta também incentivos à produção nacional de componentes como baterias e montadoras de VEs (Estados Unidos, 2022).

O IRA teve uma rápida resposta de empresas globais do setor de eletromobilidade que visam expandir as operações de fabricação nos Estados Unidos. Entre agosto de 2022 e março de 2023, grandes fabricantes de VE e baterias anunciaram um total de investimentos pós-IRA de 52 bilhões de dólares nas cadeias de suprimentos de VE da América do Norte, dos quais 50% são destinados à fabricação de baterias e cerca de 20% para componentes de bateria e fabricação de VE (EIA, 2023).

Em 2022, as vendas de carros elétricos nos Estados Unidos aumentaram 55% em relação a 2021. As vendas de VEs aumentaram em 70%, chegando a quase 800.000 unidades e confirmando o segundo ano consecutivo de forte crescimento. Esse aumento nas vendas de carros elétricos é relevante nos Estados Unidos, considerando que as vendas totais de carros caíram 8% em 2022 em relação ao ano anterior, uma diminuição mais acentuada do que a média global de -3% (IEA, 2023). Ao todo, os Estados Unidos contribuíram com 10% do crescimento global em vendas, com o estoque total de carros elétricos alcançando 3 milhões de veículos elétricos. A participação de carros elétricos nas vendas totais de carros foi de mais de 10% no terceiro quadrimestre de 2023, subindo mais de 6% em 2021 (ICCT, 2023) (Figura 16).

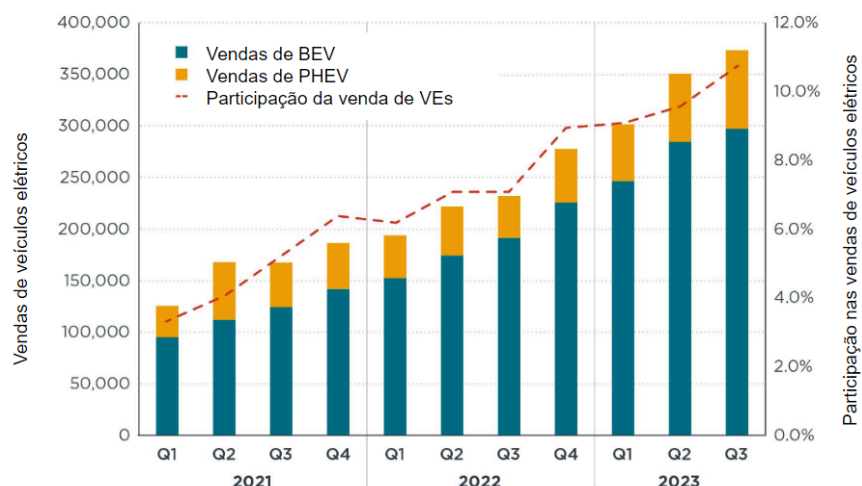


Figura 16: Vendas e participação na frota de VEs leves nos EUA (AAI, 2023)

Embora a infraestrutura de carregamento e a autonomia de condução tenham melhorado ao longo dos anos, elas permanecem preocupações para os motoristas nos EUA, dadas as longas distâncias de viagem típicas no país e a baixa disponibilidade de alternativas de transporte público como trens (que a Europa, por sua vez, apresenta). Em 2021, a Lei de Infraestrutura Bipartidária alocou 5 bilhões de dólares para o desenvolvimento de infraestrutura de carregamento de VEs e 2,5 bilhões de dólares em subsídios para carregamento e abastecimento, visando expandir a rede de carregamento de VE até 2026 para suportar o aumento previsto na frota de VEs, que deve chegar a 26,4 milhões até 2030 (EEI, 2023).

Brasil

O Brasil demonstra um crescimento rápido no mercado de veículos elétricos (VEs), mas partindo de uma base relativamente pequena quando comparada a mercados líderes globais. Foi registrado um total de 93.927 unidades vendidas no ano de 2023, um aumento de 91% em relação a 2022, quando foram emplacados 49.245 automóveis (ABVE, 2023). De janeiro a agosto de 2023, os eletrificados leves alcançaram 3,6% de participação no mercado em relação às vendas totais de veículos. Em 2022, essa fatia era de 2,29% (EPBR, 2023). A maior concentração de veículos elétricos está na região Sudeste, com destaque para o estado de São Paulo, que é

responsável por 35% dos emplacamentos - um total de 17.349 unidades nos últimos oito meses. O Rio de Janeiro e Santa Catarina ocupam a segunda e terceira posição (ABVE, 2023).

O aumento da participação de mercado dos veículos eletrificados também impulsionou o desenvolvimento da rede de eletropostos pelo país. Em 2023, o Brasil tinha 3.800 eletropostos públicos e semipúblicos, representando um crescimento de 28% com relação a 2022, quando esse número chegava a 2.955, (ABVE, 2023). O desafio, no contexto, é aumentar a infraestrutura proporcionalmente com o aumento da frota de veículos. Com a aprovação do PL do Combustível do Futuro, programa para a mobilidade de baixo carbono, o governo calcula que a indústria automobilística brasileira investirá cerca de R\$14 bilhões em infraestrutura para carros elétricos até 2035 (Brasil, 2023).

O VEs foram isentos de imposto de importação entre os anos de 2015 e 2023, numa iniciativa de incentivar a descarbonização da frota brasileira (Ministério do Desenvolvimento e Indústria, 2023). A possibilidade de isenção de IPVA (Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores) existe no Brasil e depende do estado de compra. Por exemplo, o estado de Alagoas concede isenção total no primeiro ano e redução a 1% a partir do segundo. No distrito federal, o IPVA é completamente coberto pelo estado, isto é, os proprietários têm isenção total do imposto. Já em São Paulo, o governo estadual não institui o desconto do IPVA. A cidade de São Paulo, no entanto, oferece isenção de sua cota (50%), como restituição para o contribuinte. (ANFAVEA, 2024)

A adoção de VEs no Brasil ainda encontra obstáculos, como a necessidade de expansão da infraestrutura de recarga e os altos custos iniciais de aquisição. No entanto, iniciativas governamentais, como incentivos fiscais e a implementação de políticas de logística reversa para baterias têm contribuído para superar essas dificuldades (ANFAVEA, 2023). As principais empresas do mercado automotivo têm lançado novos modelos de VEs no Brasil, aumentando a variedade disponível para os consumidores e a competitividade dos preços (Renavam, 2023).

Para o futuro, espera-se que a participação de mercado dos veículos elétricos no Brasil continue a crescer, com uma projeção de 150.000 novos VEs vendidos em 2024, um aumento de 60% (ABVE, 2023). A tendência é que o mercado brasileiro de VEs se alinhe às metas globais de redução de emissões de carbono, com um número cada vez maior de cidades e empresas adotando frotas elétricas.

Baterias

As baterias são fundamentais para a descarbonização do setor de transportes leves, segurança das redes elétricas e armazenamento de energias de fontes intermitentes. Uma bateria é um dispositivo que converte a energia química contida em seus materiais ativos, diretamente em energia elétrica, por meio de uma reação eletroquímica de oxidação e redução (Dell, 2001). Numa bateria, a célula é definida como a menor unidade de armazenamento de energia e contém um ânodo (polo negativo), um cátodo (polo positivo) e um eletrólito para permitir a troca de íons entre os dois. Quando a bateria está sendo usada para fornecer energia, isto é, no seu período de descarga, os íons movem-se do ânodo para o cátodo através do eletrólito, enquanto os elétrons passam pelo circuito externo, o que gera corrente elétrica. O processo de recarga é o inverso (Dell, 2001). A figura 17 apresenta um esquema geral simplificado sobre o funcionamento de uma bateria.

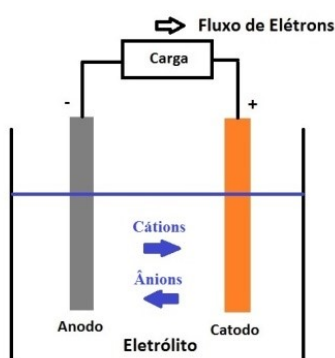


Figura 17: Esquema de funcionamento de uma bateria (STA, 2022)

Em uma bateria, três conceitos fundamentais são a corrente elétrica, a tensão e a capacidade. A corrente elétrica (I) é medida em ampères (A) e mede o fluxo de

elétrons em um circuito, expressando a quantidade de carga elétrica que flui por unidade de tempo. Já a tensão elétrica (V) é medida em volts (V) e mede a diferença de potencial entre dois pontos em um circuito, representando a força motriz que a corrente elétrica gera. Por fim, a capacidade de uma bateria indica a quantidade total de carga elétrica que ela pode armazenar, isto é, quanto tempo a bateria pode fornecer uma determinada corrente antes de se esgotar. Por exemplo, uma bateria com capacidade de 1000 mAh pode fornecer uma corrente de 1 ampère durante 1 hora antes de a carga acabar (Dell, 2001).

As baterias podem apresentar uma diversidade de tecnologias, como composições à base de chumbo, lítio, sódio, níquel, e bateria de fluxo de vanádio (Santos, 2023). A figura 18 mostra a relação entre os diversos tipos de baterias e suas características. Observa-se que as baterias de íons de lítio são as que performam melhor em termos de potência, capacidade, eficiência e densidade de energia. As baterias de sódio destacam-se pela energia específica e as de vanádio, pelo tempo de vida útil. (Li et al, 2023)

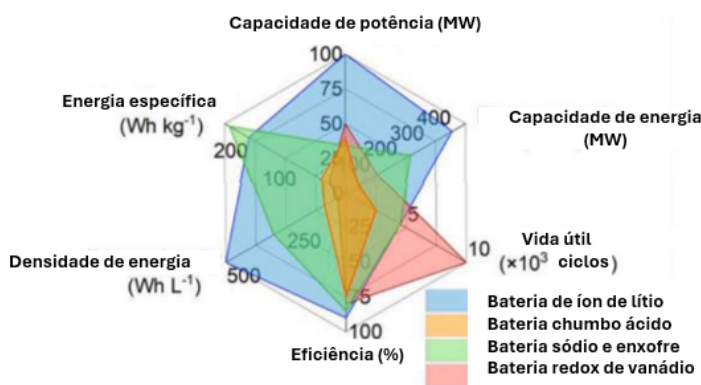


Figura 18: Distribuição de tipos de baterias e características (Li et al, 2023)

As baterias de Li-ion têm se mostrado a mais importante tecnologia de baterias durante a última década, respondendo por mais de 90% das plantas *BESS* do mundo (IDTechEx, 2023). Em segundo lugar, aparecem as baterias de chumbo ácido, seguida pelas baterias à base de sódio (figura 19).

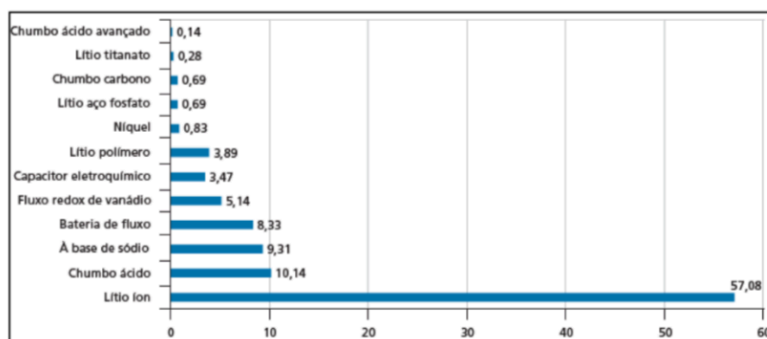


Figura 19: Tecnologias de baterias em BESS em operação no mundo (IDTechEx, 2023)

Projeta-se que até o ano de 2030, o mercado de baterias de íons de lítio chegará a um valor de 400 bilhões de dólares e quase 5 TWh (GBA, 2022). O crescimento por baterias é exponencial e está principalmente relacionado ao mercado de veículos elétricos leves, como mostra a figura 20 - no ano de 2022, 92% da demanda de baterias foi para o mercado de VEs leves.

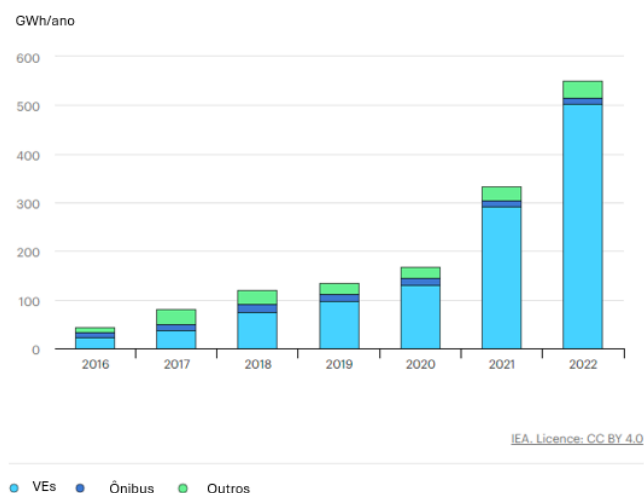


Figura 20: Demanda de baterias por modo (IEA, 2023)

Quanto aos tipos de tecnologias de íons de lítio, essas baterias são subdivididas de acordo com o tipo de material ativo presente no cátodo. Os principais tipos de baterias de íons de lítio são:

- NMC: Óxido de Cobalto Manganês de Níquel Lítio - $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$ ($x+y+z=1$);

- LFP: Fosfato de ferro-lítio - LiFePO_4 ;
- NCA - Óxido de Alumínio Cobalto Níquel Lítio - $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$ ($x+y=1$);
- LMO - Óxido de Manganês de Lítio - LiMnO_2 ;
- LCO - Óxido de Lítio-cobalto - LiCoO_2 .

Embora todas essas baterias envolvam íons de lítio, possuem características e aplicabilidades diferentes, descritas brevemente na lista a seguir (Melançon, 2023).

- NMC: *Lithium Nickel Manganese Cobalt*

As baterias NMC são populares por diversas razões, dentre as quais a alta densidade de potência e energia. Essas costumam ser as mais usadas em carros elétricos, oferecendo maior densidade energética e autonomia aos veículos, além de bom compromisso entre desempenho e custo.

No entanto, oferecem um número menor de ciclos comparada a LFP, normalmente entre 1000 e 2000 ciclos apenas, e possuem menor desempenho na segurança. Adicionalmente, elas requerem Cobalto e Níquel, que são minerais mais caros e ambientalmente não amigáveis.

- LFP: *Lithium iron phosphate*

As baterias LFP destacam-se pela segurança e durabilidade, apresentando uma vida útil mais longa que a NMC (entre 2000 e 5000 ciclos). Além disso, são consideradas mais limpas, pois utilizam ferro que é um mineral de menor impacto ambiental que Cobalto e Níquel, além de ser de menor custo e disponível em vários locais.

Contudo, apresentam menor densidade de energia, o que pode ser um impeditivo para sua aplicação em veículos elétricos de grande porte. Para os sistemas de BESS, este problema é menos considerado pois usualmente há mais espaço disponível para baterias e o peso do sistema não é um fator crucial para o projeto.

- NCA: *Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide*

As baterias NCA são similares às NMC, apresentando densidade de energia compatível com as baterias do tipo NMC. Por outro lado, são mais sensíveis a

excursões térmicas. De forma análoga às baterias NMC, as baterias NCA têm vida útil curta, cerca de 1000 a 2000 ciclos e ainda, dependem dos minerais que vão se tornando escassos para serem manufaturados como Cobalto e Níquel.

- LMO: *Lithium-Ion Manganese Oxide*

As baterias LMO são muito pouco usadas porque elas oferecem características similares às LFP mas com vida útil muito menor, cerca de 500 a 800 ciclos. Embora o custo de produção seja menor que as LFP, a vida útil mais curta leva a um custo global maior, que inclui manutenção e reposição.

- LCO: *Lithium-Ion Cobalt Oxide*

As baterias LCO foram as primeiras na categoria Li-ion. São encontradas em laptops, smartphones , apresentando baixa potência, e altos teores de Co. Este tipo de baterias possui tendência de substituição por outros tipos e não são utilizadas em veículos elétricos e BESS na escala do grid.

A tabela 2 apresenta os principais componentes de uma bateria de lítio. O cátodo, componente em que se encontra o lítio, apresenta o maior percentual de massa de uma bateria, representando de 25 a 35%. Observa-se grandes quantidades de alumínio e cobre, materiais que já possuem alto potencial de reciclagem hoje em dia (AMA, 2020).

Tabela 2: componentes de uma bateria comercial de íon de lítio (Accurec, 2020)

Componente da bateria	Materiais	Massa - %
Caixa	Aço ou alumínio	20-25
Cátodo (eletrodo positivo)	LCO, NMC, NCA, LFP ou LMO	25-35
Ânodo (eletrodo negativo)	Grafite	14-19
Eletrólito	LiPF dissolvido em PC, EC, DMC ou DEC	10-15
Guia de cátodo	Alumínio	5-7

Guia de ânodo	Cobre	5-9
Separador	PP, PE	1-4
Outros (aditivos)	Silicone, carbono	Balanço

É importante ressaltar que os materiais presentes numa bateria de íons de lítio são mais complexos e potencialmente tóxicos quando comparados com outras tecnologias de baterias anteriormente utilizadas (Sironval et al, 2018). As células apresentam alto risco de incêndio e explosão devido aos eletrólitos compostos por solventes orgânicos de carbonato que são altamente voláteis e inflamáveis; a presença de sais de lítio no eletrólito (LiPF_6) também pode causar efeitos tóxicos em seres humanos devido a produtos de decomposição gasosa, às vezes letais (por exemplo, HF, benzeno, etc.) e efeito carcinogênico através da liberação de partículas inaláveis de compostos de Ni/Co/Mn.

Minerais críticos

As baterias são compostas de diversos minerais fundamentais ao seu funcionamento e alguns dos principais deles são considerados críticos, isto é, possuem disponibilidade limitada, concentração geográfica desequilibrada, instabilidade política ou preocupações ambientais (IFPEN, 2018). Para entender melhor os critérios de criticidade de um material, a Figura 21 apresenta os fatores que influenciam essa classificação, sendo os principais os riscos de oferta, impactos ambientais e vulnerabilidades associadas às partes relacionadas.

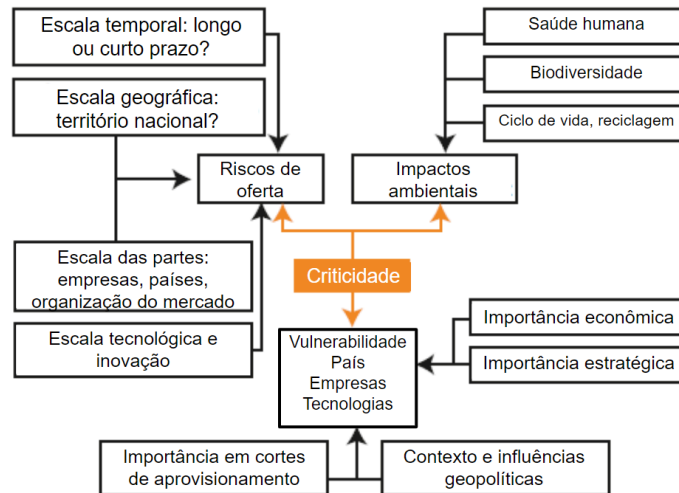


Figura 21: Diferentes níveis de criticidade (Helbig et al, 2016)

Na última década, observou-se uma demanda crescente por baterias e pelos minerais necessários na fabricação, dentre eles principalmente o lítio, cobalto e níquel. Em 2022, a demanda por lítio superou a oferta (assim como em 2021), apesar do aumento de 180% na produção desde 2017 (Bloomberg NEF, 2022). Em 2022, cerca de 60% da demanda por lítio, 30% de cobalto e 10% de níquel era destinada a baterias de veículos elétricos (EIA, 2022). Apenas cinco anos antes, em 2017, essas proporções eram de aproximadamente 15%, 10% e 2%, respectivamente, o que mostra a rápida expansão deste mercado nos últimos anos.

Como já foi observado para o lítio, a mineração e o processamento desses minerais críticos precisarão aumentar rapidamente para apoiar a transição energética dos VEs e tecnologias de geração de energia limpa. Como mostra a Figura 22, a demanda para esses três minerais cresceu a cada ano desde 2016, sendo que para o lítio este crescimento foi o mais rápido. Além disso, observa-se também que a demanda de lítio e de cobalto é majoritariamente associada à fabricação de VEs e de outras baterias (IEA, 2023).

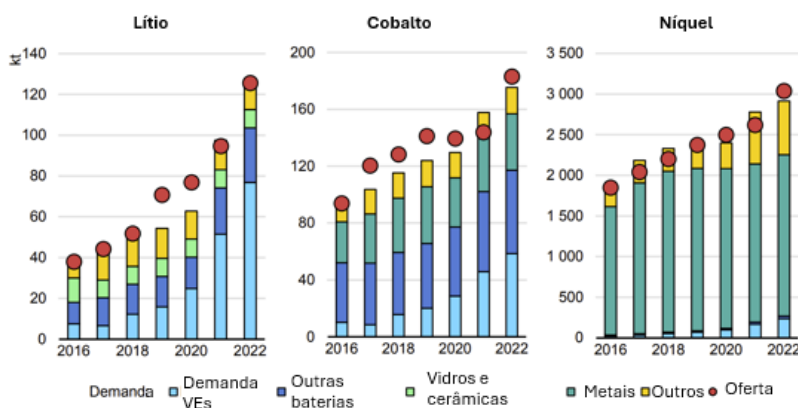


Figura 22: Demanda dos materiais necessários às baterias (IEA, 2023)

Lítio

O lítio é o elemento central em baterias recarregáveis de íon-lítio por causa de suas propriedades físico-químicas, principalmente de densidade de energia e conversão que permitem a fabricação de dispositivos de armazenamento mais leves (Minos, 2023). Primeiramente, do ponto de vista geográfico, percebe-se que as reservas de lítio são concentradas principalmente no Chile, Argentina e Austrália, como mostra a Figura 23 (USGS, 2017). A Austrália é o país com a maior produção de lítio no mundo, tendo produzido 61 kt no ano de 2022, o que representou 47% da produção mundial. No mesmo período de tempo, o Chile produziu 38,9 kt e a China 19 kt (Energy Institute, 2023). Para uso exclusivo da cadeia de produção de baterias, a produção de carbonato de lítio foi de aproximadamente 650 kt e espera-se uma produção de aproximadamente 1500 kt para o ano de 2030 (McKinsey MineSpans, 2022).

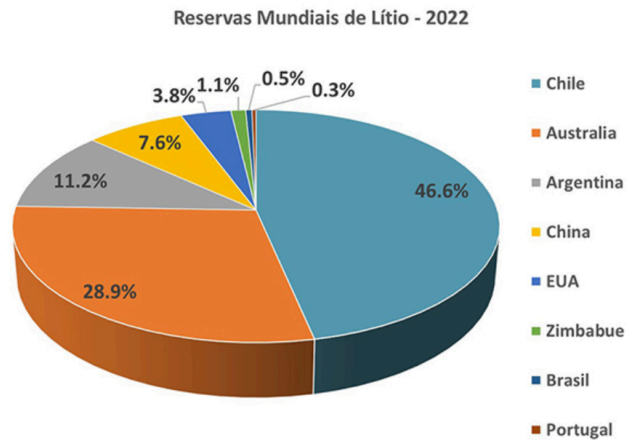


Figura 23: Distribuição de reservas de lítio (SGB, 2023)

Considerando a importância do lítio para a fabricação de baterias e a projeção de crescimento nos setores de mobilidade elétrica e estocagem de bateria na rede elétrica, projeta-se um crescimento da demanda de lítio nas próximas décadas, como mostra a figura 24. Observa-se que a projeção para a demanda de lítio segue o modelo de “curva S” - um crescimento acelerado até 2040 seguido de uma relativa estabilidade até 2050. Essa demanda é de mais de 85% destinada a VEs e apenas 4% ligada a baterias de rede. (IEA, 2023)

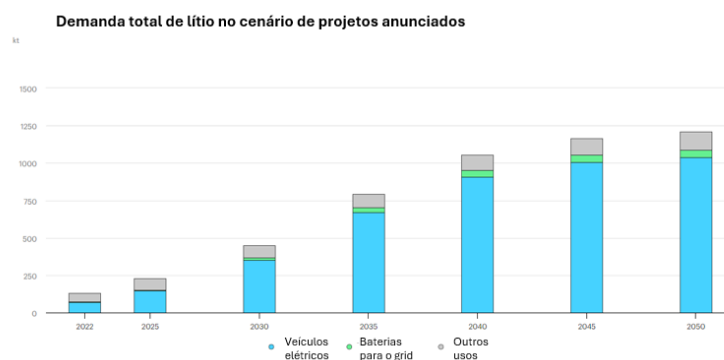


Figura 24: Demanda total de lítio no cenário de projetos anunciados (IEA, 2023)

A extração de lítio pode ser realizada principalmente por dois métodos, dependendo de onde ele se encontra. O lítio de lagos de água salgada, como é encontrado na América do Sul (Chile, Bolívia e Argentina), é obtido através da evaporação de bacias que contém a salmoura (Rueter, 2023). No ano de 2022, 45 mil

toneladas de lítio foram extraídas dessa forma, de um total estimado de 42 milhões de toneladas disponíveis (USGS, 2022). Este método é menos intensivo em emissões de CO₂, mas apresenta problemas relacionados à necessidade de alto volume de água para bombear a salmoura (IVL, 2019).

O segundo método de obtenção vem de rochedos sólidos, em que é necessária a extração por perfuração e jateamento, seguida de esmagamento dos grumos extraídos e separação química do lítio (Rueter, 2023). Essa extração é mais intensiva em carbono pois exige seis vezes mais energia do que a de evaporação e é o principal método de obtenção do lítio australiano.

Há ainda um outro método mais recente de extração, impulsionado principalmente pelo aumento na demanda de lítio, a extração de lítio geotérmico. Este método envolve a obtenção do mineral a partir de fontes geotérmicas, em que a água subterrânea contém lítio. Após a extração da água geotérmica, o lítio é concentrado por meio de processos como evaporação solar ou precipitação química, separando-o de outros minerais dissolvidos e depois separado e purificado (Vale, 2021).

Cobalto

O cobalto é um componente essencial de baterias de íon-lítio, contribuindo para a estabilidade e densidade de energia. Em termos de concentração geográfica, o cobalto possui o cenário mais crítico dos 3 minerais: mais da metade da reserva de cobalto no mundo está na República Democrática do Congo (figura 25). No ano de 2021, a produção foi de 175 kt de cobalto, dos quais 75% foram extraídos na República Democrática do Congo.

PRODUÇÃO E RESERVAS MUNDIAIS DE COBALTO EM 2019 (t)

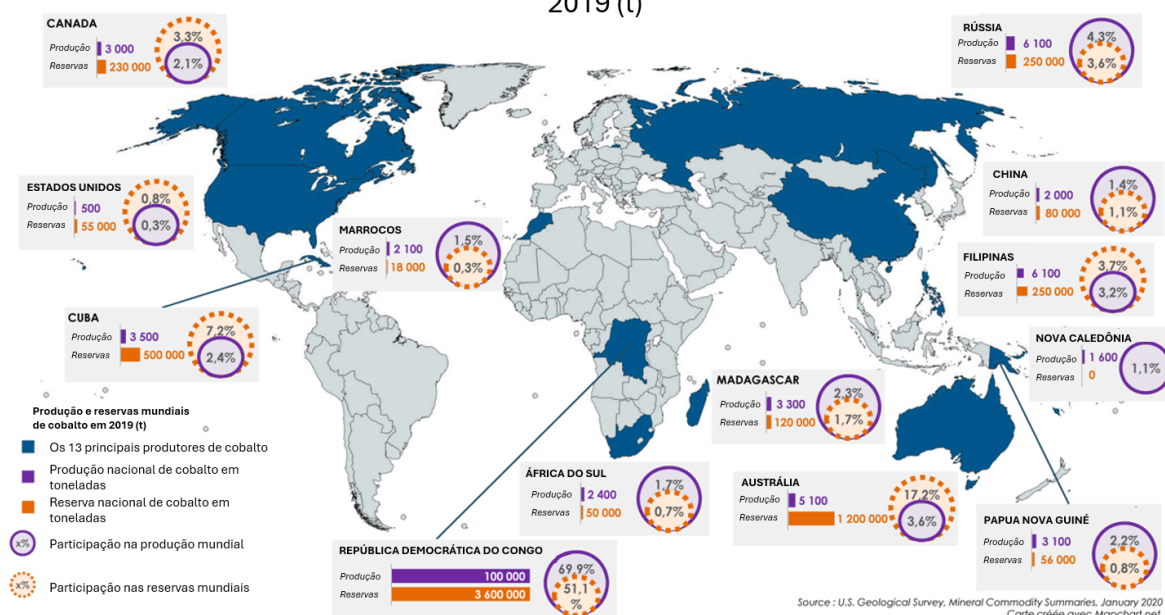


Figura 25: Distribuição da produção e reservas de cobalto (IFPEN, 2020)

A projeção é de que mais da metade da demanda por cobalto seja relacionada às baterias (tanto para VEs quanto baterias para o *grid*) a partir do ano de 2040, como mostra a figura 26. Espera-se uma produção de 325 kt no ano de 2030 (McKinsey MineSpans, 2022).

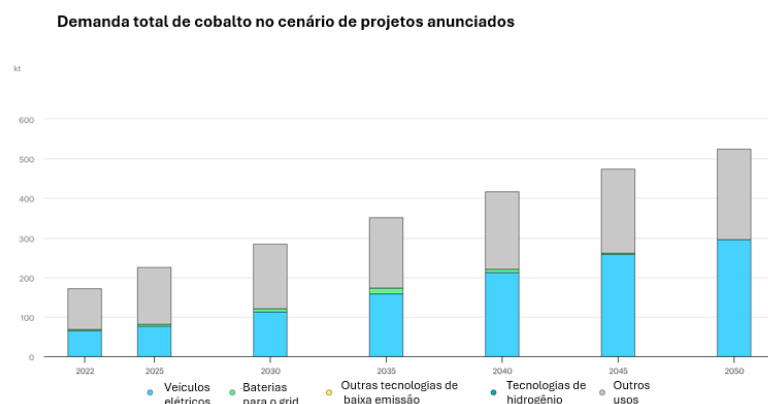


Figura 26: Demanda total de cobalto no cenário de projetos anunciados (IEA, 2023)

No entanto, questões como trabalho infantil, condições de trabalho perigosas e impactos ambientais estão relacionadas à extração de Cobalto na República

Democrática do Congo (IFPEN, 2020). A extração de cobalto muitas vezes ocorre em minas artesanais, onde trabalhadores, incluindo crianças, enfrentam condições perigosas e exploração. Além disso, a mineração de cobalto pode levar à contaminação do solo e da água, causando danos aos ecossistemas locais e à saúde das comunidades próximas.

A extração do cobalto envolve a mineração do minério de cobalto, que pode ocorrer tanto a céu aberto quanto em minas subterrâneas. Após a extração, o minério é triturado, moído separado de outros minerais indesejados. Em seguida, o cobalto é extraído do concentrado de minério através de processos hidrometalúrgicos ou pirometalúrgicos, seguido por etapas de refino para alcançar a pureza desejada. O cobalto refinado é então utilizado na produção de uma variedade de produtos, incluindo ligas metálicas, baterias de íon-lítio e ímãs de alta performance (IFPEN, 2022).

Níquel

O níquel é outro elemento necessário em baterias de íon-lítio. A produção de níquel em 2021 foi de 2500 kt, sendo esperada uma produção de quase 4000 kt em 2030 (McKinsey MineSpans, 2022). Embora as reservas de níquel sejam mais amplamente distribuídas geograficamente (figura 27), a mineração e o processamento do metal possuem impactos ambientais significativos. A Indonésia, Filipinas, Rússia e Nova Caledônia são grandes produtores de níquel, como indica a figura.

PRODUÇÃO E RESERVAS MUNDIAIS DE NÍQUEL EM 2019 (t)

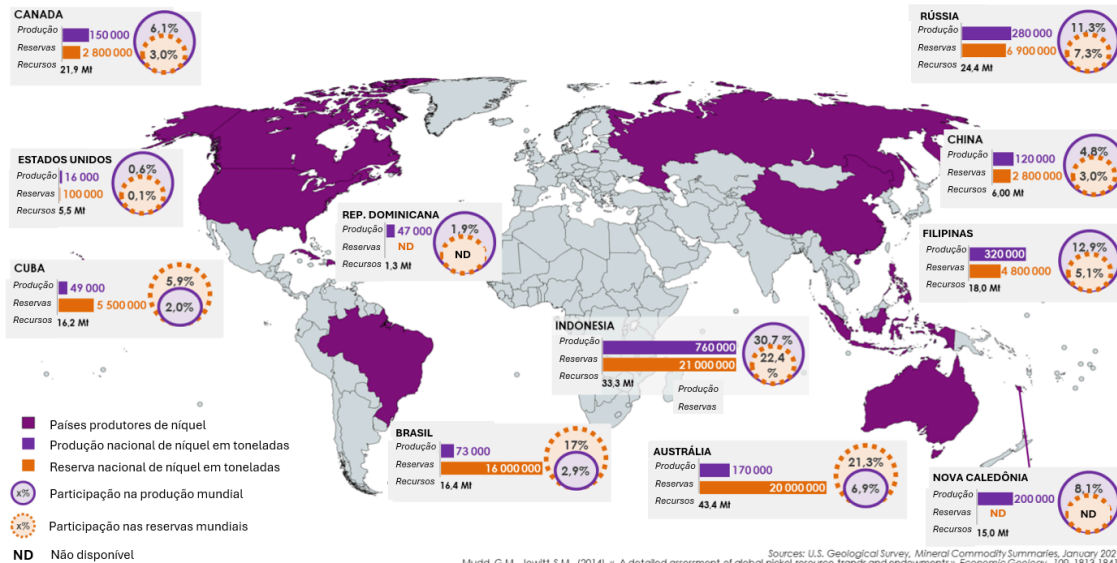


Figura 27: Distribuição da produção e reservas de níquel (IFPEN, 2020)

A extração do níquel ocorre principalmente por meio da mineração de depósitos de minério contendo o mineral. Inicialmente, o minério de níquel é extraído da terra, seja por mineração a céu aberto ou subterrânea, dependendo da profundidade e da natureza do depósito. Após a extração, o minério é triturado e moído e, em seguida, o níquel é extraído do concentrado de minério (Da Silva, 2001). Após a extração, o níquel passa por etapas de refino para remover impurezas e alcançar o grau de pureza desejado para ser comercializado.

Em muitas regiões, a mineração de níquel está associada à degradação ambiental, como a contaminação do solo e da água devido a vazamentos de produtos químicos tóxicos e resíduos de mineração (IFPEN, 2020). Além disso, as operações de mineração de níquel podem causar problemas de saúde para os trabalhadores e residentes locais devido à exposição a substâncias nocivas. Questões sociais também estão presentes, incluindo deslocamento de comunidades, conflitos de terras e questões trabalhistas.

Em suma, os materiais críticos possuem extração e produção com potenciais danos significativos ao meio ambiente e o risco de esgotar os recursos naturais

disponíveis. Por isso, à medida que a demanda por esses materiais continua a aumentar rapidamente, torna-se fundamental mitigar a pressão sobre os recursos naturais e reduzir a necessidade de novas minas e extrações.

Reduzir a necessidade de materiais críticos também será importante para a sustentabilidade, resiliência e segurança da cadeia de suprimentos. Ao reciclar materiais críticos, como o lítio, cobalto e o níquel utilizados em baterias, pode-se recuperar esses recursos, reduzindo a dependência de novas fontes de mineração. Isso não apenas ajuda a preservar o meio ambiente e conservar recursos preciosos, mas também pode reduzir a emissão de poluentes e minimizar os impactos sociais associados à mineração. A reciclagem de materiais críticos pode contribuir para a segurança do fornecimento desses materiais, reduzindo a vulnerabilidade das cadeias de suprimentos a interrupções e flutuações nos preços globais (Niri, 2024).

Com a crescente demanda por baterias, espera-se que o descarte de baterias de íon de lítio usadas passe por um crescimento expressivo (Zhang, 2022). Em 2020, o total de baterias de lítio em fim de vida, isto é, de 5 a 10 anos de uso, era de 250.000 toneladas, com a projeção de aumento para 464.000 em 2025, isto é, um aumento de 85% em 5 anos (Bae, 2021). Deste valor, em 2020, apenas de 2 a 5% foi coletado (Bae, 2021). Além disso, a extração de minério torna-se cada vez mais difícil e economicamente desafiadora com a diminuição das concentrações das reservas (Vale, 2012). Para a produção de baterias, verifica-se que o mais eficiente é o reaproveitamento de baterias que chegaram ao fim da vida útil (Gaines, 2021), sendo necessário uma quantidade muito menor de baterias usadas para se obter uma mesma quantidade de material pronto para fabricar baterias, como mostra a figura 28. A reciclagem pode reduzir custos em até 40%, o uso de energia e água em mais de 70% e as emissões de óxidos de enxofre em 91% ao evitar a prática de mineração, como mostrou um estudo do Centro ReCell do laboratório estadunidense Argonne (2021).

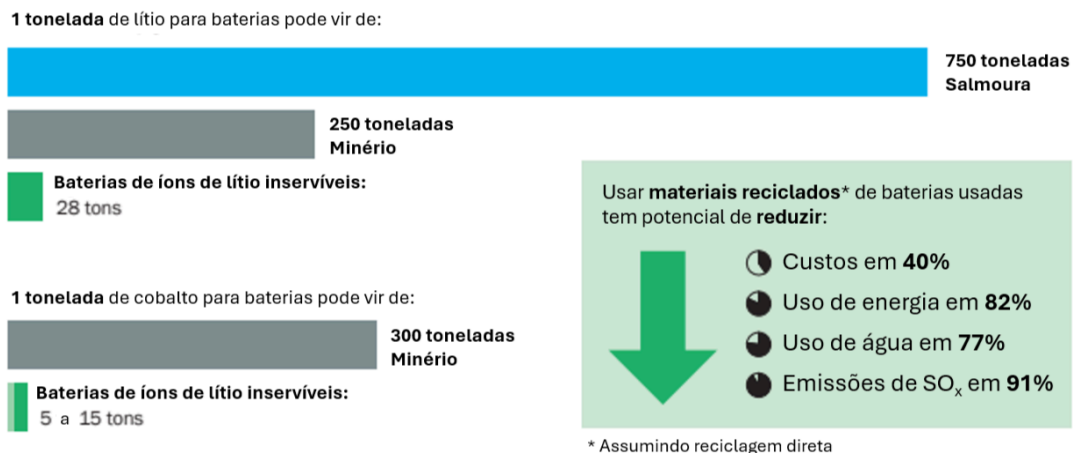


Figura 28: Benefícios de reciclar baterias de íons de lítio (Gaines, 2021)

Observa-se, portanto, que a quantidade de baterias disponíveis para serem recicladas é significativa e será necessário um esforço de coleta e de reciclagem para suprir a demanda de novas baterias a partir dos recursos presentes nos resíduos. Em suma, estudar a viabilidade dos processos de reciclagem dessas baterias é tão fundamental para a transição energética quanto o emprego delas.

Reciclagem

Economia circular

O grande problema da extração de minerais críticos é o fato de que seguem o tradicional modelo econômico linear de extrair, produzir e descartar, isto é, a cadeia de valor não aproveita os recursos presentes nos resíduos. A prática de reciclagem permite o surgimento do conceito de economia circular, modelo caracterizado pela reinserção dos resíduos nas cadeias de suprimento, por meio da reutilização, reparação, reciclagem e reintegração. Com essa nova entrada de recursos, pode-se então reduzir a extração de matérias-primas e um modelo mais resiliente, eficiente e sustentável (Wautelet, 2018).

Uma economia circular faz parte dos Objetivos Sustentáveis da ONU (ODS) adotados por todos os países membros em 2015 como parte da Agenda 2030 para o

desenvolvimento sustentável (UNDP, 2024). Ao todo, existem 17 objetivos definidos pela ONU, listados na figura 29.



Figura 29: Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (ONU, 2015)

A reciclagem de baterias está relacionada diretamente com os objetivos de número 12 (Consumo e Produção Sustentáveis), que busca padrões de produção e consumo mais sustentáveis e o de número 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), que busca o desenvolvimento de infraestruturas sustentáveis e práticas industriais mais limpas (ONU, 2015). A reutilização e a reciclagem de baterias e uma economia circular estão diretamente ligadas à redução de emissões de gases efeito estufa e de riscos geopolíticos no suprimento de materiais e energia ao redor do mundo. Para a economia circular, é fundamental o conceito de logística reversa, a estrutura que possibilita o retorno de resíduos da última etapa na cadeia de valores de volta ao início. Por exemplo, a figura 30 mostra um sistema de logística reversa em que os comerciantes são responsáveis por receber ou coletar as baterias inservíveis quando os consumidores as entregarem voluntariamente, de preferência durante a substituição por baterias novas. Os comerciantes acondicionam essas baterias em seus pontos de coleta e os distribuidores realizam coletas periódicas das baterias junto aos comerciantes, enquanto os fabricantes ou importadores fazem o mesmo com distribuidores, encaminhando as baterias inservíveis para recicladores.



Figura 30: Exemplo de sistema de logística reversa (IBER, 2022)

No contexto de baterias, a reutilização pode ser encontrada no processo chamado reciclagem direta, isto é, o reuso de baterias usadas. Baterias com menos de 80% da energia elétrica do seu valor original não possuem aplicação para EVs e precisam ser substituídas por outras (Hesselbach, 2011). Isso significa que existe ainda uma quantidade significativa de potência armazenada nas baterias consideradas em fim de vida para EVs, que pode ser reaproveitada através da reutilização (Dobó, 2023). Esse processo começa pela remanufatura, quando baterias em fim de vida útil são diagnosticadas, desmontadas, têm as células danificadas substituídas e enfim são remontadas (Chen, 2019). Projeta-se que em 2033 haverá uma quantidade de baterias usadas equivalente a 50% da demanda por novas baterias (Dobó, 2023). Neste cenário, a remanufatura das baterias gastas poderá ser capaz de economizar aproximadamente 40% do custo da utilização de novas baterias, justificando a importância econômica desta prática (Foster et al., 2014).

Além da reutilização direta, seja para veículos elétricos ou baterias destinadas a outros usos, pode-se também recuperar os minerais de baterias usadas após a segunda vida.

Processos de reciclagem

A reciclagem possui um papel na mitigação das emissões provenientes da mineração e na segurança de disponibilidade de recursos minerais para a produção de novas baterias (Niri, 2024). Para reciclar baterias de íons de lítio, existem diversos métodos e processos de reciclagem com diferentes níveis de maturidade.

Antes de reciclar uma bateria, existem duas etapas anteriores descritas abaixo:

- 1) Preparação: Processos de preparação não envolvem mudança na composição química da célula da bateria, mas inclui o desmantelamento de baterias, triagem por subtipos, descarga e separação das caixas de plástico
- 2) Pré tratamento: Nesta etapa, os componentes são alterados química ou fisicamente para que possam ser alimentados em rotas industriais já existentes. O pré tratamento pode ser mecânico ou térmico, ou uma combinação de ambos.

Do pré tratamento, obtém-se um produto conhecido como *Blackmass*, um material granular composto pelos catodos e anodos triturados das baterias. Este material é então enviado para outra instalação que recupera os metais valiosos (como cobalto, níquel e lítio). Outros materiais de saída, como folhas metálicas e invólucros de aço, também podem ser reciclados por meio de vias separadas e dedicadas (EPA, 2023).

Uma vez passadas as primeiras etapas de preparação e pré tratamento, existem duas modalidades principais de reciclagem de baterias de íons de lítio, a pirometalurgia e a hidrometalurgia.

Pirometalurgia

O processo de pirometalurgia, também conhecido como incineração ou metalurgia seca, é um método que envolve transformações físicas e químicas que utiliza altas temperaturas (1000°C) para recuperar e purificar metais (Liu et al., 2019). Para a reciclagem de baterias de íons de lítio usadas, o processo de pirometalurgia envolve normalmente a redução térmica, fusão em alta temperatura e torrefação com sal (Dobó, 2023).

Essa é uma técnica madura, já sendo utilizada para reciclagem de diversos resíduos com metais devido à sua rapidez, operação simples e flexibilidade (Chen et al, 2019). Além disso, no processo pirometalúrgico, não é necessário fazer uma pré-seleção de baterias, tipos diferentes podem ser processados ao mesmo tempo. Os produtos da pirometalurgia podem ser utilizados para sintetizar novas substâncias catódicas (Dobó, 2023).

Por outro lado, por mais que a pirometalurgia seja capaz de reciclar grandes escalas de baterias de diferentes composições, a necessidade por altas temperaturas faz com que o processo seja muito intensivo em energia e há também uma geração significativa de gases de efeito estufa. Além disso, este método geralmente não é capaz de alcançar a recuperação completa de baterias de lítio, devido à baixa eficiência de recuperação de lítio (Zhang, 2022).

Hidrometalurgia

A hidrometalurgia consiste na recuperação de metais por via líquida, utilizando soluções ácidas para a extração química dos elementos. O processo inclui extração de metais valiosos a partir de matérias-primas residuais via lixiviação em solução aquosa, purificação de soluções aquosas contendo os metais valiosos e precipitação de metais ou compostos metálicos a partir de soluções aquosas (Accurec, 2020). A lixiviação é a etapa em que os metais em estado sólido são dissolvidos numa solução aquosa. As etapas de purificação como extração por solventes e troca iônica separam os metais com propriedades semelhantes, e a precipitação em seguida, envolve a recuperação efetiva do metal a partir dessa solução aquosa (Zhang, 2022). Em particular, a recuperação hidrometalúrgica de baterias de íon de lítio usadas refere-se à extração e reciclagem de metais como Li, Ni, Co e Mn, a partir de materiais de cátodo, dependendo das diversas propriedades dos metais relevantes em soluções aquosas (Dobó, 2023).

Este método envolve um consumo alto de ácidos, que podem ocasionar corrosão de equipamentos e poluição ambiental (Zhang, 2022).

Tal método possui diversas vantagens em relação aos outros (Zhang, 2022)

- Metais puros podem ser obtidos diretamente a partir da solução de lixiviação.
- Principalmente realizada em temperatura entre 25-90°C e (muito menos intensiva em consumo de energia e combustíveis).
- O volume de rejeitos do processo é menor e mais simples do que a escória queimada, o que implica um processo de disposição mais fácil e econômico.

- O processamento hidrometalúrgico apresenta maiores rendimentos de recuperação de Li.
- Menor emissão de CO₂

Em suma, a figura 31 mostra as 3 vias explicadas para uma bateria que chegou ao fim de sua vida útil.



Figura 31: Resumo das rotas de reciclagem de baterias de lítio

Espera-se um total de 7,8 milhões de toneladas de baterias de VEs chegando ao fim de vida útil por ano até 2040 (IDTechEx, 2020). Até o ano de 2043, a projeção é de que 23,8 milhões de toneladas de baterias sejam recicladas ao todo (IDTechEx, 2023).

Como reação a essa expansão projetada, diversas empresas vêm anunciando novas instalações e capacidades de fábricas de reciclagem. A figura 28 mostra uma visão mundial do cenário de reciclagem de baterias de veículos elétricos até o fim de 2023 e a partir de 2024 (IDTechEx, 2023). Observa-se atuação importante de empresas como Li-Cycle, Veolia, e Ace Green Recycling, que aparecem em projetos em mais de um continente (Figura 32). Além disso, destaca-se uma atuação concentrada principalmente nos EUA, Europa e China, as regiões com maiores frotas de veículos elétricos hoje em dia.

A empresa Li-Cycle, por exemplo, possui capacidade instalada de produção de 30kt de blackmass, uma mistura de lítio, cobalto e níquel, recuperada durante o processo de reciclagem (Li-Cycle, 2023). No ano de 2023, apenas 6,8 kt de blackmass foram processados pela Li-Cycle, indicando um uso de 23% da capacidade (Business Wire, 2023).

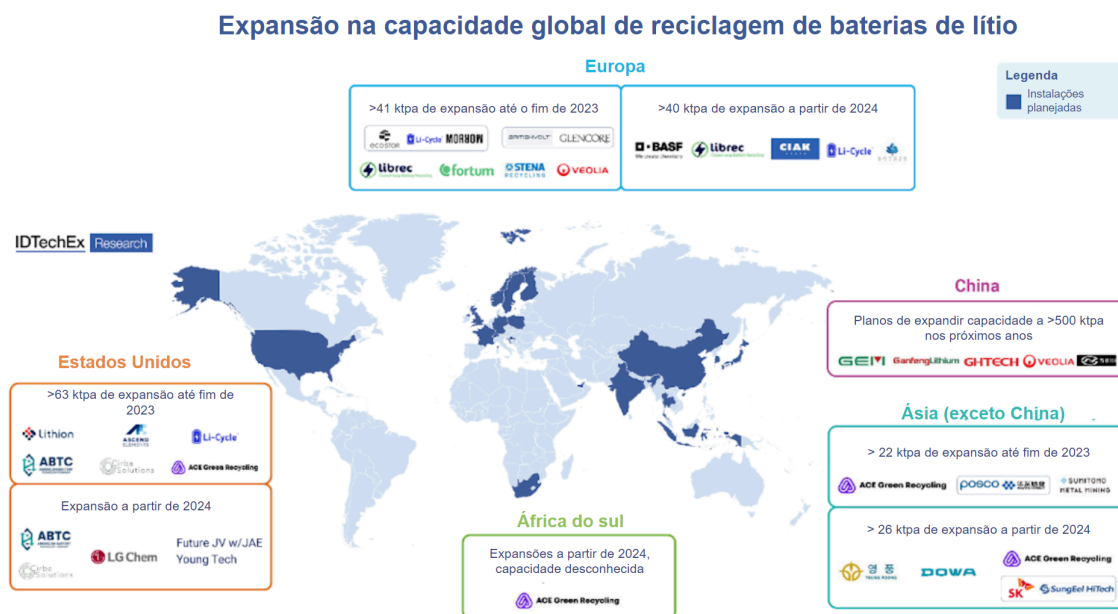


Figura 32: Relação de empresas envolvidas na expansão da capacidade mundial de reciclagem de baterias de lítio (IDTechEx, 2023)

Legislação

Para que uma economia circular seja possível com a reciclagem de baterias, é fundamental que a coleta seja realizada e que existam incentivos e fiscalização da prática de reciclagem. Para tanto, uma parte fundamental são medidas governamentais de regulamentação, fiscalização e incentivos para a coleta e reciclagem de baterias.

Atualmente, a União Europeia possui uma regulamentação completa e específica para o destino de resíduos de baterias de íons de lítio. Até o ano de 2023, a regulamentação de baterias era orientada pela Diretiva de Baterias da UE 2006 66. No entanto, buscando se adaptar às novas tecnologias de baterias e novos requisitos de

sustentabilidade, a União Europeia implementou uma nova classificação de baterias, em vigor desde 17 de agosto de 2023 (Moko Energy, 2023).

Com essa nova regulamentação, foi definido um cronograma de implementação gradual de medidas, apresentado na figura 33. A partir de maio de 2024 entra em vigor a primeira medida gradual, com a exigência de fornecer um detalhamento sobre as pegadas de carbono de baterias vendidas durante todas as fases de vida útil, desde a extração de matérias-primas até o descarte (União Europeia, 2023). Em 2025, devem entrar em vigor políticas de *due diligence* (diligência devida) para avaliar e evitar riscos sociais e ambientais na cadeia de valor das baterias, buscando maior responsabilidade e práticas éticas. A reciclagem em si tem sua primeira aparição na regulamentação também em 2025, quando as baterias deverão ser identificadas para coleta seletiva, com metas de reciclagem e uso de minerais reciclados estabelecidos para reduzir a dependência de matérias-primas primárias e promover a economia circular (UE, 2023).

A partir de 2027, os fabricantes deverão começar a projetar produtos de forma a facilitar a remoção e substituição das baterias pelos usuários finais, promovendo a cultura de reparo e prolongando a vida útil dos produtos. Por fim, a partir de 2031, a regulamentação europeia exigirá uma porcentagem mínima de minérios vindos de baterias recicladas presentes em baterias novas. Depois de 2031, uma bateria nova deverá conter 16 % de cobalto, 85 % de chumbo, 6 % de lítio e 6 % de níquel que tenham sido valorizados de resíduos (UE, 2023).

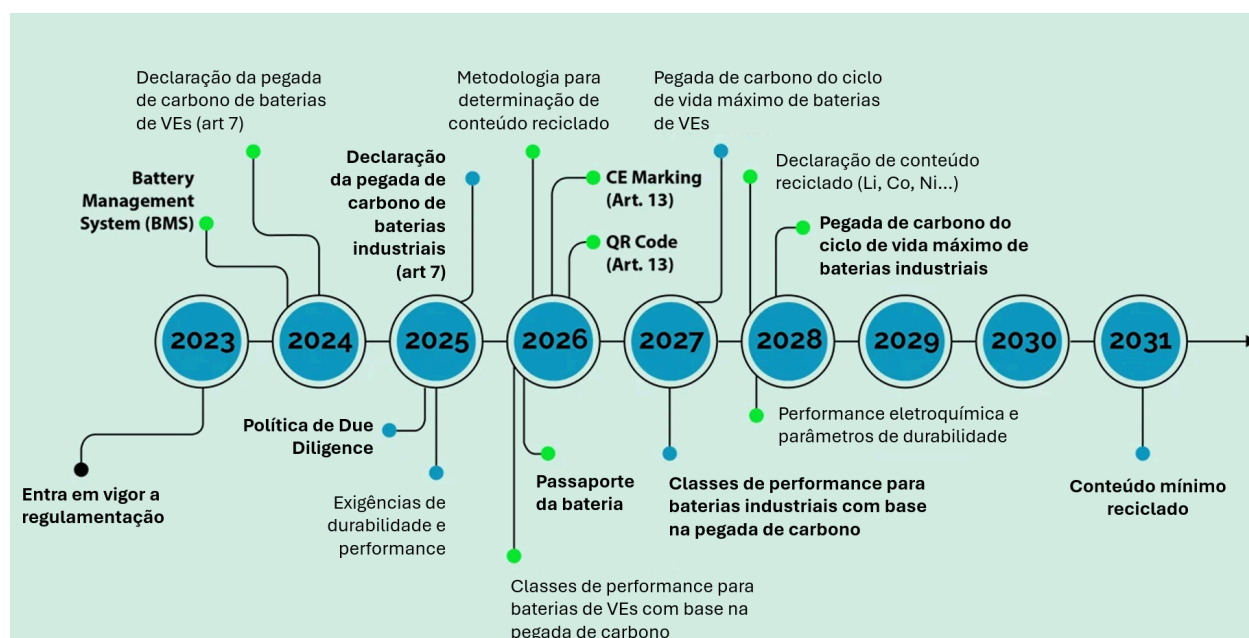


Figura 33: Cronograma de implementação das medidas anunciadas pela nova regulamentação de baterias da UE (União Europeia, 2023)

Este novo conjunto de leis regulará todo o ciclo de vida das baterias – da produção à reutilização e reciclagem – e garantirá que sejam seguras, sustentáveis e competitivas (UE, 2023). A tabela 3 apresenta novas medidas a serem implementadas para cada etapa do ciclo de vida de uma bateria.

Tabela 3: mudanças em diversas fases da vida de uma bateria antes e depois das novas regras (UE, 2023)

A vida de uma bateria		
	AGORA	COM AS NOVAS REGRAS UE
Mineração	novos materiais brutos de fora da UE, poluição dos recursos naturais, uso de energia	diligência de origem dos materiais brutos, requisitos de intensidade de carbono e uso mais eficiente de matérias-primas
Refinaria	alto impacto ambiental de carbono, poluição, diferentes padrões, baixa durabilidade	mais conteúdo reciclado em novas baterias, segunda vida para baterias industriais, requisitos de desempenho e durabilidade, requisitos de intensidade de carbono para processos de produção
Mercado	falta de padrões comuns, concorrência de outros mercados, falta de informação para clientes ao longo da cadeia de valor	Promover uma indústria de baterias circular, mercado para matérias-primas secundárias,

		rotulagem mais clara e informações com "passaportes de bateria" e códigos QR
Fim de uso	Substâncias tóxicas como cádmio, mercúrio liberadas no meio ambiente, recursos como cobalto e lítio perdidos no lixo, poucos serviços eficazes de coleta, tratamento e reciclagem de resíduos, nenhuma segunda vida para baterias	Esquemas de coleta rigorosos e metas de reciclagem, melhores maneiras de reutilizar baterias antigas, rastreabilidade de baterias, reciclagem mais eficiente de baterias usadas, garantir o tratamento ambientalmente adequado de baterias usadas, incentivos para mais reciclagem

Além da União Europeia, o Departamento de Energia dos Estados Unidos (US DOE) também elaborou uma regulamentação nacional específica para baterias de lítio. O plano nacional para baterias de íon de lítio (2021-2030) prevê principalmente 5 objetivos aos Estados Unidos para essa fase de expansão. No entanto, cabe dizer que tal medida ainda não possui caráter de lei. A regulamentação apresentada pela secretária de Energia do país possui 5 principais objetivos, descritos brevemente na tabela abaixo.

Tabela 4: Resumo dos objetivos previstos pela regulamentação estadunidense

Objetivo	Descrição
1 - Garantir o acesso a materiais brutos e refinados e descobrir alternativas para minerais críticos em aplicações comerciais e de defesa	Desenvolver um suprimento confiável de insumos de material brutos, refinados e processados, juntamente com esforços paralelos para desenvolver substitutos sustentáveis e diversificar o suprimento a partir de fontes secundárias e não convencionais, reduzindo a dependência da fabricação de baterias de íon de lítio dos Estados Unidos em materiais escassos, especialmente cobalto e níquel. A produção nova ou expandida deve atender aos padrões modernos de proteção ambiental, condições de trabalho de melhor prática e consulta comunitária rigorosa.
2 - Apoiar o crescimento de uma base de processamento de materiais dos EUA capaz de atender à demanda nacional de fabricação de baterias.	Desenvolver infraestrutura de processamento nacional para não depender de mercados internacionais para o processamento da maioria dos materiais brutos de baterias de íon de lítio, buscando custos competitivos e oferta segura.
3 - Estimular os setores de fabricação de	Desenvolver um quadro de política federal que

eletrodos e células nos EUA.	apoie a fabricação de eletrodos, células e pacotes domesticamente e incentive o crescimento da demanda por baterias de íon de lítio. Uma atenção especial será necessária para garantir acesso a empregos de energia limpa e uma cadeia de suprimentos mais equitativa e durável que funcione para todos os americanos. Além disso, a fabricação de eletrodos, células e pacotes pode se beneficiar de mais pesquisa e desenvolvimento (P&D) para reduzir custos, melhorar o desempenho e apoiar o crescimento da demanda.
4 - Possibilitar a reutilização no fim da vida útil e a reciclagem de materiais críticos nos Estados Unidos em grande escala e uma cadeia de valor competitiva completa.	Desenvolver novos métodos para coletar, classificar, transportar e processar materiais reciclados de baterias de íon de lítio, com foco na redução de custos. Além da reciclagem, desenvolver mercado para a reutilização de células de bateria de EVs aposentados para aplicações secundárias, incluindo armazenamento de rede.
5 - Manter e avançar a liderança tecnológica em baterias dos EUA, apoiando fortemente pesquisa científica e desenvolvimento, educação STEM e desenvolvimento da força de trabalho.	Manter e avançar a liderança tecnológica de bateria dos EUA, apoiando fortemente P&D científico, educação STEM e formação de mão de obra qualificada. Incentivar pesquisas em novos materiais de eletrodos e eletrólitos para baterias de íon de lítio de próxima geração e avanços em baterias de estado sólido e métodos de fabricação de materiais, eletrodos e células inovadores, apoiada por proteção de propriedade intelectual (PI) e movimentação rápida de inovações do laboratório para o mercado por meio de parcerias de P&D público-privadas como as estabelecidas na indústria de semicondutores.

A legislação brasileira não prevê medidas específicas para o descarte e reciclagem de baterias de íons de lítio. A lei em vigor atualmente é a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que prevê medidas para gestão e gerenciamento de resíduos em geral no país (Brasil, 2010). Segundo o artigo 33 da PNRS, deve haver a implementação de um sistema de logística reversa para baterias, sendo obrigação dos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes (Brasil, 2023). A legislação impõe que este sistema de retorno dos produtos após uso do consumidor exista de

maneira independente ao sistema público de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos. Esta mesma cláusula se aplica a agrotóxicos e seus resíduos, pneus, óleos lubrificantes, lâmpadas fluorescentes e produtos eletroeletrônicos, o que mostra o caráter pouco específico. Um decreto adicional institui certificados que se aplicam à cadeia de valor de reciclagem, como o Certificado de Crédito de Reciclagem de Logística Reversa - CCRLR e o Certificado de Crédito de Massa Futura, que são documentos que podem auxiliar a guiar o consumidor quanto ao cumprimento de medidas de reciclagem e logística reversa dos produtos. Até o momento, tais medidas têm caráter voluntário.

DISCUSSÃO

Nos próximos anos, o Brasil continuará a ter uma forte expansão na frota de veículos elétricos. Para projetar a expansão da frota elétrica brasileira, Castro et al (2021) analisaram 3 cenários de expansão, com penetrações de 1, 4 e 10% de VEs até o ano de 2030 (figura 34). Pode-se, adicionalmente, realizar uma comparação com dados reais registrados para os anos de 2022 e 2023 para comparar com os cenários projetados no estudo. Em 2022, foram registrados 120518 VEs no Brasil e, em 2023, 222198 (DENATRAN, 2023). Se a tendência se mantiver, pode-se esperar uma frota de mais de 8 milhões de VEs até o ano de 2030 no Brasil.

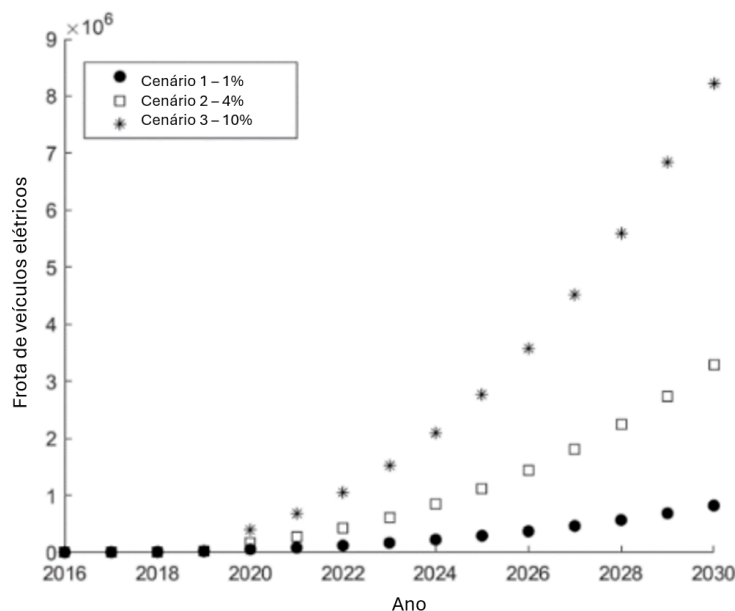


Figura 34: Projeção da frota de veículos elétricos em 2030 em 3 cenários (Castro et al, 2021)

No entanto, esse crescimento até agora é todo apoiado em importações, já que não existe fabricação de veículos elétricos no Brasil. Em novembro de 2023, foi aprovada a retomada de tributação para veículos eletrificados no Brasil de forma gradual, tendo tido início em janeiro de 2024. A ideia é que até 2026, todos os VEs importados possuam uma mesma tributação de 35% do valor (Brasil, 2023). Esta medida busca possui viés protecionista para a indústria nacional.

Além disso, em dezembro de 2023 foi aprovado o programa nacional de Mobilidade Verde e Inovação (Mover), que amplia as exigências de sustentabilidade da frota automotiva e promove a produção de novas tecnologias na área de mobilidade e logística. O Mover oferece incentivos fiscais para empresas que investem em descarbonização e atendem aos requisitos do programa. Estes incentivos fiscais devem chegar a mais de 3 bilhões de reais ao ano até 2028. Ele introduz novas medidas, como a medição das emissões de carbono "do poço à roda" e um sistema de tributação baseado em indicadores pautados em sustentabilidade, buscando um sistema que premie carros menos poluentes. (Brasil, 2023)

Observa-se, logo, que é de interesse do governo brasileiro um desenvolvimento e expansão da indústria automotiva nacional, incentivando assim a continuação do crescimento da frota brasileira, inclusive de elétricos. Um programa de logística reversa para baterias automotivas de chumbo ácido, assinado pelo IBER com a ABRABAT e o Sincopeças, organizado em 2019 foi responsável pela coleta de 46 milhões de baterias de chumbo entre 2019 e 2021, o que gerou a reinserção de 838 mil toneladas de materiais na cadeia produtiva (IBER, 2022). Como mostra a figura 35, as metas para coleta dessas baterias foram atingidas em todos os estados brasileiros. Isso mostra que o Brasil pode possuir capacidade de organização e coleta na escala necessária com a expansão de VEs.

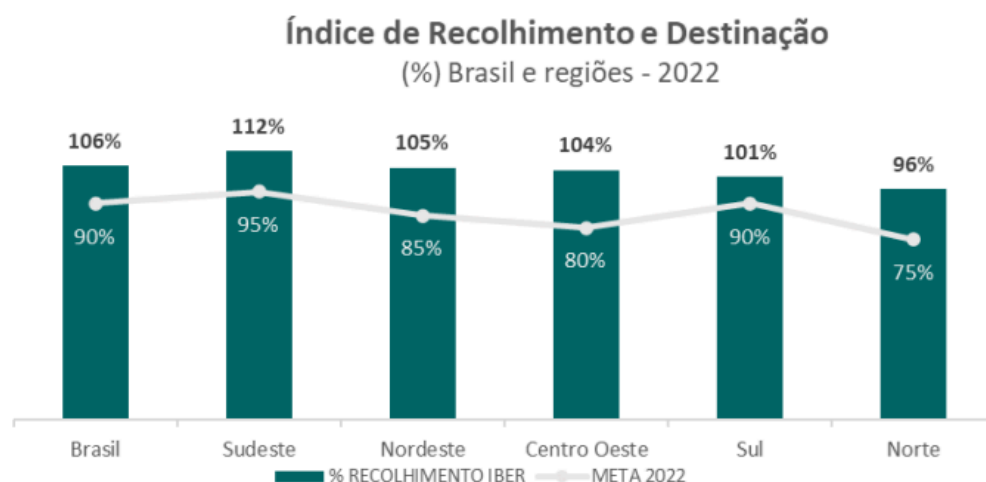


Figura 35: Índice de Recolhimento e Destinação de baterias de chumbo-ácido (IBER, 2022)

Porém, não há medida no Brasil que regulamente a gestão especificamente da cadeia de valor de baterias de íons de lítio. Por isso, com o surgimento de políticas de regulamentação nesse sentido em países desenvolvidos, pode-se usar as existentes como exemplo para sugestão de elaboração de uma medida nacional. No entanto, não é pertinente avaliar o cenário brasileiro sob a mesma óptica dos países desenvolvidos e avançados na penetração de frota elétrica. Cabe, para o cenário nacional, uma análise personalizada, levando em consideração os pontos fortes e fracos do país como um país em desenvolvimento.

Em primeiro lugar, deve-se considerar os pontos fortes do país e como ele se posiciona na economia global. O Brasil é um dos 5 maiores produtores minerais do mundo (KPMG, 2024). Em 2023, a produção nacional de níquel, um dos minerais críticos para baterias, foi a oitava maior do mundo (Statista, 2023). Dado que mesmo com esforços de reciclagem de baterias, a demanda de níquel continuará subindo ao redor do mundo, isso se apresenta como uma oportunidade para o Brasil se destacar como grande exportador do minério. O Brasil também produz cobalto como co-produto da extração de níquel. Isso é interessante de um ponto de vista tanto econômico quanto estratégico, já que, nas próximas décadas, os países que controlarem a extração de materiais críticos terão domínio geopolítico como quem controlava petróleo no século passado (Schneider, 2024). Sendo assim, uma medida interessante a curto prazo é o incentivo da mineração de minérios críticos como níquel, cobalto e lítio.

Muitas técnicas de mineração possuem extração parecidas com as necessárias para reciclagem de baterias. Por isso, as grandes empresas mineradoras no Brasil têm um potencial em atuar nesse setor, por possuírem o capital necessário para investimentos e um domínio de conhecimento do setor.

Para que essa atividade tenha um retorno direto para a economia circular, uma medida que poderia ser implementada é a obrigatoriedade de reinvestimento de uma parte da receita dessas empresas em pesquisas no setor de reciclagem de baterias. As empresas petrolíferas possuem essa obrigação com a ANP, de reinvestir 1% da receita bruta em projetos de pesquisa e desenvolvimento em inovações, segundo a Lei nº 9.478/1997 no artigo 50 (Brasil, 1997).

Assim, pode-se incentivar pesquisas em processos de reciclagem de baterias de íons de lítio, parte essencial para que exista viabilidade dessa atividade no Brasil. Laboratórios brasileiros com linhas de pesquisa específicas nessa área poderiam liderar pesquisas de desenvolvimento em conjunto com empresas da área para inauguração de fábricas de reciclagem no Brasil. Como a grande quantidade de resíduo de baterias de lítio no Brasil ainda deve demorar alguns anos devido ao estágio de desenvolvimento em que está (em comparação aos países desenvolvidos em que o problema de reciclagem já é um problema a curto prazo), o país pode se beneficiar desse tempo para desenvolver métodos mais robustos e mais economicamente viáveis, além de poder priorizar métodos menos intensivos em energia e menos emissores de carbono.

A extensão territorial brasileira é um grande complicador para a expansão de postos de carregamento de veículos elétricos pelo país, somado ao alto investimento necessário que só aumenta com a necessidade de descentralização. Além disso, cabe também discutir o caso do etanol que, desde o programa proálcool, tornou-se um caso de sucesso mundial de incorporação de biocombustíveis e redução da pegada de carbono da frota de veículos leves. Para o Brasil, pode fazer mais sentido a pesquisa em veículos híbridos a etanol, que se beneficiam da menor pegada de carbono pela eficiência de um motor elétrico e de toda a infraestrutura logística de distribuição e de postos de combustível já instalada ao redor do país.

Para a elaboração desta medida, foi considerado que o Brasil não será um grande fabricante de baterias e, por isso, não precisa assegurar acesso em grande escala a minerais críticos. Uma política brasileira não deve prever necessariamente que baterias sejam feitas no Brasil, tendência observada em outros países. Isso é uma decisão política e depende da estratégia nacional, mas considerando o nível de maturidade tecnológica e a boa relação econômica que o país tem com a China, EUA e Europa, pode fazer sentido essa parceria econômica.

Com base nessas considerações, foi elaborada a matriz SWOT abaixo, que apresenta os pontos fortes e fracos, oportunidades e ameaças da atuação do Brasil no desenvolvimento mundial de eletrificação da mobilidade.

<p>S (pontos fortes)</p> <p>Reservas minerais brasileiras</p> <p>Energia elétrica limpa</p> <p>População crescent</p> <p>Forte presença de biocombustíveis</p> <p>Infraestrutura já instalada de abastecimento</p>	<p>W (pontos fracos)</p> <p>Falta de política nacional específica para estratégia de gestão de baterias de íons de lítio</p> <p>Falta de investimento em tecnologias de reciclagem</p> <p>Falta indústria nacional de fabricação de baterias de íons de lítio</p>
<p>O (oportunidades)</p> <p>Criação de empregos</p> <p>Aumento do investimento em pesquisa</p> <p>Empresas mineradoras com potencial de atuar na reciclagem de baterias</p> <p>Crescimento econômico</p>	<p>T (ameaças)</p> <p>Vulnerabilidade à oferta de baterias de outros países</p> <p>Vulnerabilidade a picos de preços</p>

Figura 36: Matriz para análise do cenário brasileiro (elaboração da autora, 2024)

Hoje em dia, a legislação brasileira responsabiliza apenas os fabricantes e usuários para a manutenção do ciclo da economia fechada de reciclagem de baterias. Para que a reciclagem ocorra de maneira eficiente e correta, assim como mostram exemplos, é necessário que o governo aja diretamente, promovendo em todas as instâncias o respeito das normas definidas.



Figura 37: Esquema da atuação do governo na economia circular (Li et al, 2024)

O Brasil precisa de uma estratégia multissetorial para assegurar toda a cadeia de valor e logística de baterias de íons de lítio provenientes de veículos elétricos e projetos de

estocagem em redes para se manter relevante no mercado. Um resumo de possíveis medidas está apresentado a seguir.

Medidas a Curto Prazo (até 2035) - fase pré expansão da escala de baterias inservíveis.

- DNA da bateria: Exigir informações de origem, porcentagem de material reciclado, pegada carbono da fabricação, rastreabilidade e análise de ciclo de vida das baterias de lítio de carros importados ao Brasil
- Estipular níveis máximos aceitáveis de emissão de carbono para carros comerciais
- Incentivos a veículos híbridos a etanol
- Desenvolver infraestrutura de carregamento
- Desenvolver crescimento de mineração para exportação de minérios críticos com investimento em P&DI para reciclagem de baterias

Medidas a Longo Prazo (após 2035) - grandes volumes de baterias inservíveis no mercado interno

- Garantir coleta de baterias - incentivos a usuários que descartarem corretamente as baterias como devolução de valor em dinheiro ou redução na compra de outra bateria ou peça e elaboração de metas de coleta
- Desenvolvimento de processos de reciclagem para aplicação em fábricas brasileiras
- Aproveitar baterias de VEs para o mercado crescente de grid storage BESS

Medidas a Longuíssimo Prazo (uma vez estabelecido um mercado de reciclagem de baterias de lítio brasileiro)

- Estipulação de um mínimo de quantidades recicladas presentes nas baterias de novos veículos vendidos

A colaboração entre o setor público e privado será crucial para acelerar essa transição, através do desenvolvimento de políticas de incentivo mais robustas e da construção de uma infraestrutura de suporte adequada. Com esses esforços conjuntos, o Brasil pode superar os desafios existentes e se posicionar como um líder na gestão de baterias usadas de veículos elétricos e projetos BESS na América Latina.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tabela 5: Resumo dos desafios, partes interessadas e soluções

Desafios	Partes Interessadas	Soluções
Altos CAPEX para fábricas de reciclagem	Governo brasileiro, empresas de reciclagem, empresas de mineração	Política de reinvestimento da receita de mineradoras em pesquisas de reciclagem
Indisponibilidade de recursos para baterias de lítio	Governo brasileiro, empresas de mineração	Incentivo de pesquisas de novos métodos
Garantir que todas as baterias serão destinadas de forma correta	Governo brasileiro, empresas de baterias, usuários	Regulamentação adequada - criação de lei
Indústria de biocombustíveis e infraestrutura nacional de postos poderia ficar subutilizado (risco de desempregos)	Postos, indústria sucroenergética, empresas automotivas	Desenvolvimentos de carros híbridos a etanol

REFERÊNCIAS

IEA, World Energy Outlook 2023, IEA, Paris

<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>, Licença: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Anexo A) IPCC, 2023: Contribuição dos grupos I, II e III para a sexta avaliação do relatório do Painel Intergovernamental da Mudança Climática [Time de Autores: H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Genebra, Suíça

NOAA, Global Monitoring Laboratory CO₂ trends 2023.

<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/> Acesso em: 25 fev. 2024

ZANFER, Gustavo 2022 - “Entenda o Acordo de Paris, assinado por 196 países e discutido na COP27” Publicado na CNN Brasil

<https://www.cnnbrasil.com.br/internacional/entenda-o-acordo-de-paris-assinado-por-196-paises-e-discutido-na-cop27/>

MCTIC, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2021: Acordo de Paris.

https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/acordo-de-paris-e-n-dc/arquivos/pdf/acordo_paris.pdf

RONAGHI Marzieh, SCORSONI Eric, The Impact of COVID-19 Outbreak on CO₂ Emissions in the Ten Countries with the Highest Carbon Dioxide Emissions, J Environ Public Health, 2023. Disponível em

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10281825/#:~:text=A%20study%20published%20in%20Nature,year%20earlier%20on%20April%207.>

ZHANG, Q., HU, Y., JIAO, J. *et al.* The impact of Russia–Ukraine war on crude oil prices: an EMC framework. *Humanit Soc Sci Commun*, 2024.

<https://doi.org/10.1057/s41599-023-02526-9>. Acesso em: 25 fev. 2024

RITCHIE Hannah (2020) - "Cars, planes, trains: where do CO2 emissions from transport come from?" Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: 'https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-transport' [Online Resource]

RENEWABLE Energy Progress Tracker – Data Tools - IEA. 2023 Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/renewable-energy-progress-tracker>. Acesso em: 25 fev. 2024.

DE SOUZA e Silva, Rogério, Utilização De Sistemas De Armazenamento De Energia Em Baterias No Setor Elétrico E As Perspectivas Para O Brasil, 2022 Radar: tecnologia, produção e comércio exterior. 13-17. 10.38116//radar68art2.

MURRAY, 'Largest approved BESS in Europe' claimed in Germany as regulators extend grid fee exemption to 2029, Energy Storage, 2023 Disponível em: <https://www.energy-storage.news/largest-approved-bess-in-europe-claimed-in-germany-as-regulators-extend-grid-fee-exemption-to-2029/>

Energy Institute, New BESS in UK is second largest in Europe, 2023 <https://knowledge.energyinst.org/new-energy-world/article?id=138347>

DALL-ORSOLETTA Alaize, FERREIRA Paula, DRANKA Géremi Gilson, Low-carbon technologies and just energy transition: Prospects for electric vehicles, Energy Conversion and Management: X, Volume 16, 2022

GALLI Claudio, SUPERCHI Francesco, PAPI Francesco, FERRARA Giovanni, BIANCHINI Alessandro, Innovative power smoothing techniques for wind turbines using batteries and adaptive pitch regulation, Journal of Energy Storage, Volume 84, Part B, 2024

FEKRAT Nasim, Carros usados aumentam poluição em mundo em desenvolvimento. 2020 Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2020/10/1730592#:~:text=Em%20todo%20o%20mundo,%20o,da%20poluição%20do%20ar%20urbano>. Acesso em: 26 fev. 2024.

CAMPOS F.M, ARAUJO D. N., TOLEDO O.M, FERNANDES L. E.S., BORBA A.T, Tecnologias E Aplicações De Sistemas De Armazenamento De Energia Para Suporte À Integração De Fontes Renováveis No Brasil, IX Congresso Brasileiro de Energia Solar 2022.

CEMIG, Projeto inédito de sistema de armazenamento de energia por baterias é desenvolvido pela Cemig, 2023, disponível em: <https://inova.cemig.com.br/central-de-noticias/sistema-armazenamento-baterias/>

Brasil, Projeto de Lei PL 4516/2023, Dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono, o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação, o Programa Nacional de Diesel Verde e o marco legal da captura e da estocagem geológica de dióxido de carbono. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/propostas-legislativas/2388242>

US DOE, How regenerative Brakes Work. 2020 Disponível em: <https://www.energy.gov/energysaver/how-regenerative-brakes-work#:~:text=Regenerative%20brakes%20work%20by%20reversing,over%20time%20when%20used%20regularly>. Acesso em: 25 fev. 2024.

EDF Renewables, How do electric cars work? 2020. Disponível em: <https://www.edfenergy.com/energywise/how-do-electric-cars-work>. Acesso em: 25 fev. 2024.

ANDRADE Rodrigo, China se torna o maior produtor de carros elétricos no mundo Centro de Pesquisa em Ciência, Tecnologia e Sociedade. 2022. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/noticias/noticias/345-china-se-torna-o-maior-produtor-de-carros-eletricos-no-mundo>. Acesso em: 25 fev. 2024.

LEW, Linda. China prorroga incentivos para impulsionar sua indústria de veículos elétricos. 21 jun. 2023. Disponível em: <https://www.bloomberglinea.com.br/internacional/china-prorroga-incentivos-para-impulsionar-sua-industria-de-veiculos-eletricos/>. Acesso em: 25 fev. 2024.

SIMPSON, Charlie; PENNEY, Xander; SULLIVAN, Edward. Public charging infrastructure trends in Europe. 4 abr. 2023. Disponível em: https://www.ey.com/en_gl/strategy/how-europe-can-scale-its-public-charging-infrastructure-for-ev-market#:~:text=as%20of%202021.-,By%202035,%20EVs%20are%20forecast%20to%20account%20for%20around%20half,UK%20and%20Germany,%20respectively. Acesso em: 25 fev. 2024.

JAEGER, Joel. These Countries Are Adopting Electric Vehicles the Fastest. 14 set. 2023. Disponível em: <https://www.wri.org/insights/countries-adopting-electric-vehicles-fastest>. Acesso em: 25 fev. 2024.

O'DONOVAN Aleksandra, "Electrified Transport Market Outlook 4Q 2023: Growth Ahead", Bloomberg NEF, 2024
<https://about.bnef.com/blog/electrified-transport-market-outlook-4q-2023-growth-ahead/#:~:text=With%203.7%20million%20units%20sold.and%2016.7%20million%20in%202024>.

NOGUEIRA Peixoto Couras, Daut de Jesus. Análise Comparativa Da Substituição De Motores A Combustão Por Motores Elétricos No Setor De Transportes. 2021. UFERSA, Mossoró, 2021.

ÉCO2MIX - Les données de marché. 2023. Disponível em: <https://www.rte-france.com/eco2mix/les-donnees-de-marche>. Acesso em: 25 fev. 2024.

Tesla, Página de suporte ao usuário, 2020 Disponível em: <https://www.tesla.com/support/charging>

União Europeia, Objetivo 55, 2021 Disponível em: [Objetivo 55 – O plano da UE para uma transição ecológica - Consilium](#) Acesso em: 10 mar. 2024

LI, N., Hedman, K., Assessment of Energy Storage in Systems with High Levels of Renewable Resources. IEEE Transactions Sustain. Energy, 6, pp. 1103-1111, 2015.

LI, L., Bowen Wang, Kui Jiao, Meng Ni, Qing Du, Yanli Liu, Bin Li, Guowei Ling, Chengshan Wang, Comparative techno-economic analysis of large-scale renewable energy storage technologies, Energy and AI, Volume 14, 2023

TRANSITION to zero-carbon cars, trucks and buses. Disponível em: <https://systemschangelab.org/transport/transition-zero-carbon-cars-trucks-and-buses>. Acesso em: 25 fev. 2024.

NORWEGIAN EV policy. 2022. Disponível em: <https://elbil.no/english/norwegian-ev-policy/>. Acesso em: 25 fev. 2024.

DOT. Charger Types and Speeds | US Department of Transportation. 2023. Disponível em: <https://www.transportation.gov/rural/ev/toolkit/ev-basics/charging-speeds>. Acesso em: 25 fev. 2024.

ORLANDO, Fla, EEI Projects 26.4 Million Electric Vehicles Will Be on U.S. Roads in 2030, 2022. Disponível em: <https://www.eei.org/en/news/news/all/eei-projects-26-million-electric-vehicles-will-be-on-us-roads-in-2030#:~:text=The%20number%20of%20EVs%20on,on%20U.S.%20roads%20in%202030>.

DORNOFF, Jan; TIETGE, Uwe; MOCK Peter. On the way to "real-world" CO2 values: The European passenger car market in its first year after introducing the WLTP - International Council on Clean Transportation. 19 maio 2020. Disponível em: <https://theicct.org/publication/on-the-way-to-real-world-co2-values-the-european-passenger-car-market-in-its-first-year-after-introducing-the-wltp/>. Acesso em: 25 fev. 2024.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Electric Vehicle Myths | US EPA. 2023 Disponível em: <https://www.epa.gov/greenvehicles/electric-vehicle-myths>. Acesso em: 24 fev. 2024.

International Council On Clean Transportation. U.S. electric vehicle sales soar into '24 - International Council on Clean Transportation. 2023. Disponível em: <https://theicct.org/us-ev-sales-soar-into-24-jan24/>. Acesso em: 25 fev. 2024.

Estados Unidos, Inflation Reduction Act Guidebook | Clean Energy | The White House. Ago. 2022. Disponível em: <https://www.whitehouse.gov/cleanenergy/inflation-reduction-act-guidebook/>. Acesso em: 24 fev. 2024.

União Europeia, Regulamento (UE) 2023/1542 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 12 de julho de 2023, dispõe sobre novas exigências relativas a baterias

IFPEN, Quelle Criticité Du Lithium Dans Un Contexte D'électrification Du Parc Automobile Mondial?, 2018. Disponível em: <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/quelle-criticite-du-lithium-contexte-deelectrification-du-parc-automobile-mondial>

MINOS Scott, How Lithium Ion Batteries Work, Energy Saver US Department of Energy, Junho de 2023 <https://www.energy.gov/energysaver/articles/how-lithium-ion-batteries-work> Acesso em 26 fev 2024

GREIM Peter, SOLOMON A. A., BREYER Christian Assessment of lithium criticality in the global energy transition and addressing policy gaps in transportation, nature communications, 2020 <https://www.nature.com/articles/s41467-020-18402-y> Acesso em 26 fev 2024

BRGM Ficha de Síntese sobre Litio, 2020. Disponível em: <https://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/documents/2020-12/fichecriticitelithium180102.pdf>

CASTRO F. E., PEITER C. C., GOES G.S. Minerais Estratégicos E Críticos: Uma Visão Internacional E Da Política Mineral Brasileira, IPEA, 2022. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11197/1/td_2768.pdf

RUETER Gero, O dilema da extração do lítio usado em carros elétricos, dw, 2023. Disponível em: <https://www.dw.com/pt-br/o-dilema-da-extra%C3%A7%C3%A3o-do-l%C3%ADtio-usado>

-em-carros-el%C3%A9tricos/a-64994503#:~:text=O%20min%C3%A9rio%20de%20l%C3%ADtio%20%C3%A9,um%20processo%20qu%C3%ADmico%20e%20metal%C3%BArgico.&text=O%20pr%C3%B3ximo%20passo%20%C3%A9%20transportar,transformado%20em%20c%C3%A9lulas%20de%20bateria.

IVL Swedish Environmental Research Institute Lithium-Ion Vehicle Battery Production - Status 2019 on Energy Use, CO2 Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling, 2019. Disponível em:

<https://www.ivl.se/english/ivl/publications/publications/lithium-ion-vehicle-battery-production---status-2019-on-energy-use-co2-emissions-use-of-metals-products-environmental-footprint-and-recycling.html>

União Europeia, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, Blengini, G., El Latunussa, C., Eynard, U. et al., Study on the EU's list of critical raw materials (2020) – Executive summary, Publications Office, 2020,

<https://data.europa.eu/doi/10.2873/24089>

DELL R.M, RAND D.A.J, Understanding Batteries, The Royal Society of Chemistry, Capítulo 1, 2001

STA, Conceitos Básicos sobre Baterias Recarregáveis, 2020. Disponível em: [Conceitos Básicos sobre Baterias Recarregáveis - STA Eletrônica \(sta-eletronica.com.br\)](https://sta-eletronica.com.br/conceitos-basicos-sobre-baterias-recarregaveis)

DOS SANTOS, Rafael, REIS, J B O, Sistemas de armazenamento de energia baseados em baterias: tecnologias para sistemas de geração distribuída, no livro Engenharias - Automação, Robótica, Metrologia e Energia - Volume 2: estudos e tendências, 2023

DA SILVA Cristina Socorro, Balanço Mineral Brasileiro, 2001

<http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriadocumento/balancomineral2001/niquel.pdf>

WASEEM Mohammad, AHMAD Mumtaz, Battery technologies and functionality of battery management system for EVs: Current status, key challenges, and future prospectives, Journal of Power Sources, Volume 580, 2023

SOJKA Reiner, PAN Qiaoyan, BILLMANN Laura, Comparative study of Li-ion battery recycling processes, ACCUREC Recycling GmbH, 2020

SIRONVAL V., L. Reylandt, S. Ibouaaden, M. Palmi-Pallag, Y. Yakoub, M. Tomatis, B. Ucakar, R. Vanbever, E. Marbaix, D. Lison, S. van den Brule, Respiratory hazard of Li-ion battery components: elective toxicity of lithium cobalt oxide (LiCoO₂) particles via IL-1 β and HIF-1 α , Toxicology Letters, Volume 295, Supplement 1, 2018

ANEEL, Aumento da oferta de geração em 2024 será de 10,1 GW, 2023 Disponível em: Aumento da oferta de geração em 2024 será de 10,1 GW, prevê ANEEL — Agência Nacional de Energia Elétrica (www.gov.br)

CORNELIO Antonella, ZANOLETTI Alessandra, BONTEMPI Elza, Recent progress in pyrometallurgy for the recovery of spent lithium-ion batteries: A review of state-of-the-art developments, Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, Volume 46, 2024

QING Jialin, WU Xinsheng, ZENG Li, Novel approach to recycling of valuable metals from spent lithium-ion batteries using hydrometallurgy, focused on preferential extraction of lithium, Journal of Cleaner Production, Volume 431, 2023

SU Fanyun, ZHOU Xiangyang, LIU Xiaojian, YANG Juan, TANG Jingjing, Recovery of valuable metals from spent Lithium-ion batteries by pyrite method with hydrometallurgy process, Chemical Engineering Journal, Volume 455, Part 2, 2023

ZHANG Jiafeng, Chapter 10 - Application of hydrometallurgy in spent lithium-ion battery recycling, Editor(s): Siamak Farhad, Ram K. Gupta, Ghulam Yasin, Tuan Anh Nguyen, In Micro and Nano Technologies, Nano Technology for Battery Recycling, Remanufacturing, and Reusing, Elsevier, 2022

JIA Li-pan, Jiang-jiang HUANG, Ze-long MA, Xu-heng LIU, Xing-yu CHEN, Jiang-tao LI, Li-hua HE, Zhong-wei ZHAO, Research and development trends of hydrometallurgy: An overview based on Hydrometallurgy literature from 1975 to 2019, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Volume 30, Issue 11, 2020

AMA (Agentes do Meio Ambiente), Benefícios da reciclagem dos metais, 2020.

Disponível em: <https://blog.cidadeama.com.br/beneficios-da-reciclagem-dos-metais/>

DOBÓ Zsolt, DINH Truong, KULCSAR Tibor, A review on recycling of spent lithium-ion batteries, Energy Reports, Volume 9, 2023

NARZARI Rumi, GOGOI Biswajit, Capítulo 7 - Pyrometallurgy: urban mining and its future implications, Editor(s): Shashi Arya, Sunil Kumar, Global E-Waste Management Strategies and Future Implications, Elsevier, 2023

ZHANG Jiafeng, Capítulo 9 - Pyrometallurgy-based applications in spent lithium-ion battery recycling, Editor(s): Siamak Farhad, Ram K. Gupta, Ghulam Yasin, Tuan Anh Nguyen, In Micro and Nano Technologies, Nano Technology for Battery Recycling, Remanufacturing, and Reusing, Elsevier, 2022

WAUTELET Thibaut, The Concept of Circular Economy: its Origins and its Evolution, 2018

ONU, Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, 2015. Disponível em: [Objetivos de Desenvolvimento Sustentável | United Nations Development Programme \(undp.org\)](https://www.undp.org/pt-br/objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel)

TERNEL Cyprien, BOUTER Anne, MELGAR Joris Life cycle assessment of mid-range passenger cars powered by liquid and gaseous biofuels: Comparison with greenhouse gas emissions of electric vehicles and forecast to 2030. Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 97, 2021

NIRI Anahita Jannesar, POELZER Gregory A., ZHANG Steven E., ROSENKRANZ Jan, Sustainability challenges throughout the electric vehicle battery value chain, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 191, 2024

OLIVEIRA, L.M., BARBOSA, P.S.F., Baterias de Grande Porte nos Sistemas de Transmissão e Distribuição: Benefícios ao Grid e Tendências Mundiais, XIII Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, 22 a 26/01/2023

SILVA, R.D.S., Novas Tecnologias e Infraestrutura do Setor Elétrico Brasileiro Armazenamento de Energia em Baterias, Texto de Discussão no. 2746, IPEA, Rio de Janeiro, 2022

CAMPOS Felipe Melo et al., Tecnologias e Aplicações de Sistemas de Armazenamento de Energia para Suporte à Integração de Fontes Renováveis no Brasil, IX Congresso Brasileiro de Energia Solar – Florianópolis, 23/05/2022

HOLLAND Alex, End of life electric vehicle batteries recycling, IDTechEx, 2020, Disponível em:

<https://www.idtechex.com/de/research-article/end-of-life-electric-vehicle-batteries-recycling-or-second-life/20900#:~:text=With%20the%20rapid%20adoption%20of%20EVs%2C%20the%20total%20amount%20of,Battery%20Recycling%202020%2D2040%22>.

NICHOLS Conrad, HOLLAND Alex, Relatório sobre o mercado de reciclagem de baterias de íon, IDTechEx, 2023, Disponível em:

<https://www.idtechex.com/en/research-report/li-ion-battery-recycling-market-2023-2043/939>

COMO a China passou a dominar o mundo dos carros elétricos? - MIT Technology Review. 2023. Disponível em:

<https://mittechreview.com.br/como-a-china-passou-a-dominar-o-mundo-dos-carros-eletricos/>. Acesso em: 25 fev. 2024.

CHINA alcança 5,2 milhões de pontos de recarga para veículos elétricos. 2023.

Disponível em:

<https://forbes.com.br/forbeslife/forbes-motors/2023/02/china-alcanca-52-milhoes-de-pontos-de-recarga-para-veiculos-eletricos/>. Acesso em: 25 fev. 2024.

European automobile manufacturers' association. Passenger car registrations: -4.6% in 2022; +12.8% in December 2023 Disponível em:

<https://www.acea.auto/pc-registrations/passenger-car-registrations-4-6-in-2022-12-8-in-december/>. Acesso em: 25 fev. 2024.

COM 130 milhões de carros elétricos na Europa em 2035 será que a rede aguenta? 8 fev. 2022. Disponível em:

<https://expresso.pt/economia/2022-02-08-com-130-milhoes-de-carros-eletricos-na-europa-em-2035-sera-que-a-rede-aguenta-#:~:text=O%20cenário%20é%20traçado%20pela,3%20milhões%20de%20veículos%20atuais>. Acesso em: 25 fev. 2024.

Li-Cycle, Li-Cycle Starts Operations at its First European Lithium Ion Battery Recycling Facility One of the Largest on the Continent, 2023

<https://investors.li-cycle.com/news/news-details/2023/Li-Cycle-Starts-Operations-at-its-First-European-Lithium-Ion-Battery-Recycling-Facility-One-of-the-Largest-on-the-Continent/default.aspx>

HOCHSTETLER Richard Lee, MONTEIRO Eduardo Müller, Os desafios da sobreoferta de energia: vertimentos e curtailment, Instituto ACENDE Brasil, 2023. Disponível em: [Os desafios da sobreoferta de energia: vertimentos e curtailment - Acende Brasil](#)

CASTRO Francine Duarte, CUTAIA Laura, VACCARI Mentore, End-of-life automotive lithium-ion batteries (LIBs) in Brazil: Prediction of flows and revenues by 2030

SCHNEYDER Ernest, The War Below, Lithium, Copper, and the Global Battle to Power Our Lives, Atria, Edição 1, 2024

GAINES L, DAI Q, VAUGHEY JT, GILLARD S, Reciclagem direta no Centro de Pesquisa ReCell. Recycling, 2021

Retomada de tributação para veículos eletrificados é oficializada pelo DOU. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2023/novembro/retomada-de-tributacao-para-veiculos-eletrificados-e-oficializada-pelo-dou> Acesso em: 1 abr. 2024.

KPMG, Guia sobre oportunidades de mineração no Brasil de 2023. Disponível em: <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/br/pdf/2023/4/Brazil-Country-Mining-Guide-2023.pdf>

STATISTA, Países líderes na produção de níquel a nível mundial em 2023, Disponível em:<https://es.statista.com/estadisticas/635366/paises-lideres-en-la-produccion-de-niquel-a-nivel-mundial/>

IBER, Relatório Anual Logística Reversa de Baterias Chumbo-Ácido, 2022. Disponível em:[RELATORIO ANUAL LOGISTICA REVERSA DE BATERIAS CHUMBO-ACIDO IBER - 2022.pdf \(sinir.gov.br\)](#)