

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**ESTUDO SOBRE OS MÉTODOS DE RECICLAGEM E  
REUTILIZAÇÃO DE BATERIAS DE LÍTIO DE CARROS  
ELÉTRICOS**

**RODRIGO SEIJI OHTSUKA**

**SÃO CARLOS - SP**  
**2022**

# **ESTUDO SOBRE OS MÉTODOS DE RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE BATERIAS DE LÍTIO DE CARROS ELÉTRICOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Marcello Rubens Barsi  
Andreeta



## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

**NOME:** Rodrigo Seiji Ohtsuka

**RA:** 627844

**TÍTULO:** Estudo sobre os métodos de reciclagem e reutilização de baterias de lítio de carros elétricos

**ORIENTADOR(A):** Prof. Dr. Marcello Rubens Barsi Andreetta

**CO-ORIENTADOR(A):**

**DATA/HORÁRIO:** 18/04/2022, 10h

### BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Prof. Dr. Marcello Rubens Barsi Andreetta	10,0	10,0
Prof. Dr. Dereck Nills Ferreira Muche	10,0	10,0
<b>Média</b>	10,0	10,0

Certifico que a defesa de monografia de TCC realizou-se com a participação a distância dos membros Prof. Dr. Marcello Rubens Barsi Andreetta e Prof. Dr. Dereck Nills Ferreira Muche e depois das arguições e deliberações realizadas, os participantes à distância estão de acordo com as informações redigidas nesta ata de defesa.

Prof. Dr. Marcello Rubens Barsi Andreetta

## RESUMO

Os carros elétricos (EV – *electric vehicle*), meios de transporte considerados mais sustentáveis ao meio ambiente, têm-se popularizado ao redor do mundo nos últimos anos, principalmente nos Estados Unidos, Europa e China, sendo que para as próximas décadas é esperado que o volume de EVs sofra um crescimento exponencial, substituindo grande parte da frota de veículos com motor a combustão. Questões como preocupações com os efeitos do aquecimento global, incentivos governamentais à venda de EVs, rápido desenvolvimento tecnológico, e otimização nas baterias de lítio (LiB) estão entre as principais causas da expansão desse mercado. No entanto, é importante avaliar quais os impactos ambientais e destinos do grande número de LiBs que serão retirados dos EVs nos próximos anos, além do risco de falta de matéria prima para fabricação dos mesmos, principalmente lítio e cobalto. Nesse contexto surgiu o intuito deste trabalho, cujo objetivo foi de levantar um estudo sobre os possíveis efeitos sociais e ambientais dos LiBs, e dos principais métodos de reutilização e reciclagem existentes. Após consultas na literatura, foi verificado que a reutilização (conhecido como *second-life use*) e reciclagem através da hidrometalurgia e pirometalurgia serão alternativas necessárias num futuro próximo, podendo amenizar os impactos no meio ambiente e possível falta de abastecimento de matérias primas das baterias de lítio. Entretanto, ambos processos devem superar algumas barreiras para tornarem-se viáveis em grande escala, principalmente a econômica, fazendo com que a atuação de governos seja crucial para viabilizá-los.

**Palavras-chave:** Carro elétrico. Baterias de lítio. Impacto ambiental. Reutilização. Reciclagem.

## LISTA DE SIGLAS

LIB - *Lithium-ion Battery* (Bateria de íons de lítio)  
EV - *Electric Vechicle* (Veículo elétrico)  
RDC - República Democrática do Congo  
GHG – *Greenhouse gases* (Gases do Efeito Estufa)  
RUL - *Remaining usefull life* (vida útil restante)  
JBRC – *Japan Portable Battery Recycling Center*

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	2
<b>3. MERCADO MUNDIAL DE CARROS ELÉTRICOS</b> .....	3
<b>4. VOLUME MUNDIAL DAS BATERIAS DE LÍCIO</b> .....	6
<b>5. CONCEITOS GERAIS SOBRE BATERIAS</b> .....	8
5.1 FUNCIONAMENTO DAS BATERIAS DE LÍCIO DE EVS .....	8
5.2 PRINCIPAIS BATERIAS DE LÍCIO DOS CARROS ELÉTRICOS .....	9
<b>6. IMPACTOS AMBIENTAIS, SOCIAIS, E ESCASSEZ DE MATÉRIA PRIMA</b> .....	12
6.1 LÍCIO.....	12
6.2 COBALTO.....	14
6.3 IMPACTOS AMBIENTAIS DAS BATERIAS DE LÍCIO.....	16
<b>7. REUTILIZAÇÃO E RECICLAGEM DE BATERIAS DE LÍCIO DE CARROS ELÉTRICOS</b> .....	19
7.1 REUTILIZAÇÃO DAS BATERIAS DE LÍCIO.....	19
7.1.1 Etapas do Processo de Reutilização das Baterias de Lítio .....	20
7.1.2 Viabilidade Econômica .....	24
7.1.3 Aspectos Ambientais do Processo.....	25
7.1.4 Difusão Atual do Processo ao Redor do Mundo.....	26
7.1.5 Vantagens, Desvantagens e Desafios .....	27
7.2 RECICLAGEM DAS BATERIAS DE LÍCIO .....	28
7.2.1 Reciclagem Através da Hidrometalurgia .....	29
7.2.2 Pirometalurgia Associada à Hidrometalurgia .....	31
7.2.3 Aspectos Ambientais e Econômicos .....	34
<b>8. LEGISLAÇÕES AO REDOR DO MUNDO</b> .....	37
<b>9. DISCUSSÃO DE RESULTADOS</b> .....	39
9.1 CONSIDERAÇÕES EM RELAÇÃO AO MEIO AMBIENTE.....	39
9.2 PRINCIPAIS DESAFIOS .....	39
9.3 NOVAS TECNOLOGIAS .....	40
<b>10. CONCLUSÃO</b> .....	42
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	43

## 1. INTRODUÇÃO

Os carros elétricos, considerados meios de transporte mais amigáveis ao meio ambiente quando comparados com os que funcionam à combustão, têm se popularizado ao redor do mundo nos últimos anos, e a tendência é que esse mercado sofra um crescimento exponencial nas próximas décadas (BOMBE, 2021).

Como consequência, o volume dos dispositivos de armazenamento de carga aplicados nesses veículos (conhecidos como baterias de lítio) também irá aumentar, trazendo questionamentos sobre quais os possíveis impactos ambientais e sociais associados à mineração, produção e descarte (MELIN, 2020). Além disso, é importante avaliar quais os riscos de falta de matérias primas num futuro próximo, principalmente em relação ao Lítio e Cobalto, metais de elevado valor agregado que são utilizados em diversos tipos de baterias (BRÜKNER, 2020).

Nesse contexto entra o escopo deste trabalho, que busca compreender os efeitos das baterias no meio ambiente, e estudar as principais técnicas de reciclagem e reutilização dos dispositivos retirados de veículos elétricos, abordando análises e reflexões em relação às vantagens, desvantagens, dificuldades, assim como viabilidade econômica e ambiental de cada processo.

Vale ressaltar a relevância e atualidade do assunto conforme mostrado na figura 1 retirada do Google Trends, onde o gráfico descreve, em valores relativos, o interesse de pesquisas relacionadas a “*Lithium Battery Recycling*” (“Reciclagem de Baterias de Lítio, em tradução livre) entre fevereiro de 2015 e fevereiro de 2022. É possível notar que houve significativo crescimento a partir de 2019, atingindo um platô que se estende até o momento.

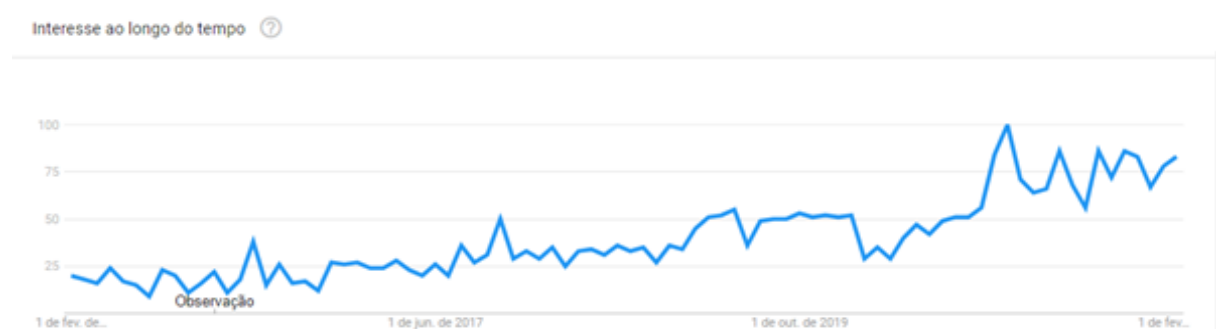


Figura 1: Tendência de Pesquisa para os termos “Lithium Battery Recycling” no Google Trends (<https://trends.google.com.br>)

## **2. OBJETIVOS**

Este trabalho possui como objetivos a avaliação dos possíveis impactos ambientais e sociais gerados pelas baterias de lítio utilizadas nos veículos elétricos ao longo da sua vida útil, isto é, desde mineração até o descarte; e o estudo dos principais métodos de reciclagem e reutilização existentes para esses dispositivos, envolvendo descrições dos processos, assim como análises sobre as vantagens, desvantagens e viabilidade no âmbito econômico e ambiental.



### 3. MERCADO MUNDIAL DE CARROS ELÉTRICOS

O volume mundial de EVs (*electric vehicle*, isto é, veículos elétricos), sejam eles híbridos ou totalmente elétricos, possui expectativa de um crescimento expressivo nos próximos anos, causado principalmente por incentivos e regulamentações governamentais, investimentos das grandes montadoras, preocupações ambientais e desenvolvimento de baterias cada vez mais eficazes, principalmente as de lítio (BOMBE, 2021).

Entre as atuações dos governos mundiais pode-se citar o anúncio de 2021 realizado pela União Europeia que decidiu em banir, a partir de 2035, automóveis que utilizam motores à combustão, ou seja, a intenção é que a partir dessa data, apenas veículos do tipo BEV sejam comercializados na Europa, decisão tomada visando a redução das emissões de CO<sub>2</sub> provenientes de automóveis e dos seus impactos ambientais (CAREY e STEITZ, 2021).

Além disso, diversas montadoras já anunciaram planos de eletrificação de seus modelos num futuro próximo, ou seja, irão abandonar os tradicionais motores à combustão interna, como por exemplo a Jaguar (2025), Bentley e Ford - Europa (2026), Volvo e Volkswagen (2030), General Motors (2035), Mercedes-Benz (2039), e também Audi e Stellantis, no entanto, sem data definida até o momento (MORENO, 2021).

Dessa maneira, a tendência é que os fatores citados previamente contribuam diretamente para o aumento da frota de automóveis elétricos nos próximos anos. Segundo uma pesquisa de mercado realizada pela Meticulous Market Research Pvt. Ltd. ([www.globenewswire.com](http://www.globenewswire.com)), a previsão é de que a venda de carros elétricos cresça em 27% no período entre 2020 e 2027, alcançando o volume equivalente a 233,9 milhões de unidades (BOMBE, 2021). Esses dados são confirmados por outra pesquisa realizada pela Deloitte Insights (*Electric vehicles: Setting a course for 2030*), onde a expectativa é de que em 2030 os veículos elétricos representem 30% do mercado global de automóveis, conforme gráfico abaixo na figura 2 (WALTON et al, 2020).

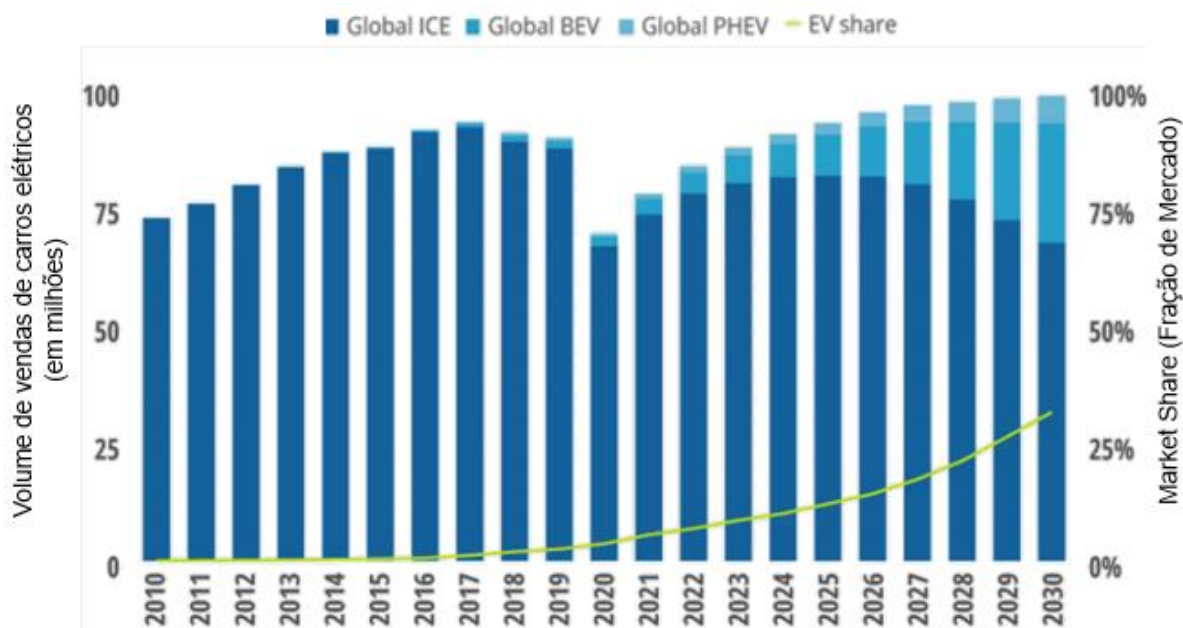


Figura 2: Volume mundial de vendas e fração de mercado dos carros elétricos estimados até 2030, evidenciando a tendência de crescimento no número de veículos no período (Adaptado de WALTON, Bryn et al., 2021)

Vale ressaltar que a velocidade e sucesso na implementação dos carros elétricos dependem de alguns fatores cruciais, como incentivos governamentais, distribuição de postos de recarga para as baterias e investimentos no desenvolvimento de novas tecnologias. Como consequência, é previsto que o volume desses veículos seja distribuído de maneira irregular ao redor do mundo, sendo que atualmente a transição da frota de veículos movidos à combustão interna para os elétricos ocorre, principalmente, nos países mais desenvolvidos (VASCONCELOS, 2017).

Segundo dados publicados no Global EV Outlook 2021 no relatório “Trends and developments in electric vehicle markets”, a frota mundial de carros elétricos alcançou em 2020 o equivalente a 10 milhões de unidades, o que representa um aumento de 43% em relação a 2019, de modo que somente a China e Europa possuem, respectivamente, 4,5 milhões e 3,2 milhões de unidades do volume mundial. Nesse mesmo relatório é citado que somente em 2020 foram registradas aproximadamente 3 milhões de unidades ao redor do mundo em 2020, sendo a Europa com 1,4 milhões de vendas, China com 1,2 milhões e Estados Unidos, 295.000 novos veículos.

Apesar da evidente distribuição heterogênea no volume de EVs entre

diferentes partes do mundo, a tendência é que a eletrificação da frota de automóveis ocorra, como comentado anteriormente, num futuro próximo, resultando em um significativo aumento no volume dos mesmos.

#### 4. VOLUME MUNDIAL DAS BATERIAS DE LÍTIO

As baterias de lítio são conhecidas por possuírem grande densidade volumétrica de energia e elevada vida útil, fatores que possibilitam uma vasta gama de aplicações, sendo que atualmente podem ser encontradas em produtos de tecnologia, como tablets, smartphones e notebooks, e são as principais fontes de energia dos automóveis elétricos comercializados ao redor do mundo.

Considerando que essas baterias desempenham papel fundamental no processo de eletrificação da frota de automóveis, é esperado um aumento significativo no consumo das mesmas nos próximos anos. Essa tendência pode ser observada na figura 3 abaixo retirada do relatório proveniente do “Circular Energy Storage”, e mostra que as baterias de lítio alcançaram o equivalente a 1,2 milhões de toneladas somente em 2019 (MELIN, 2020).

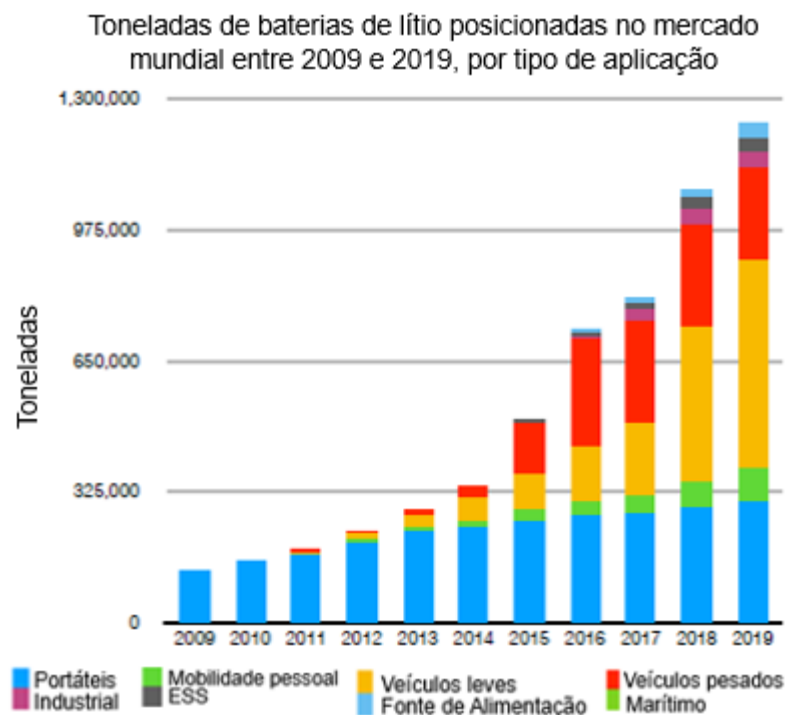


Figura 3: Representação do volume de baterias de lítio entre 2009 e 2019 presente no mercado mundial. A partir do gráfico, nota-se a tendência de crescimento em aplicações nos veículos leves e pesados (adaptado de MELIN, 2020).

Analisando o gráfico acima também é possível notar a tendência de crescimento no volume de baterias de lítio destinadas para aplicações em automóveis elétricos (*Light EV* e *Heavy EV*), um fenômeno esperado, visto que é

esperado um grande aumento na quantidade de EVs ao redor do mundo, como citado previamente.

Além disso, apesar da notável evolução na capacidade de armazenamento de carga das atuais baterias, o preço global do lítio vem sofrendo uma queda exponencial nas últimas décadas. Dessa maneira, não há perspectiva de substituição das baterias de lítio, ao menos num futuro breve, o que traz questionamentos e preocupações em relação ao descarte e impactos ambientais desses materiais (CASTELVECCHI, 2021).

## 5. CONCEITOS GERAIS SOBRE BATERIAS

Pode-se definir baterias como sistemas eletroquímicos capazes de armazenar e transformar energia química em energia elétrica. Esses dispositivos são constituídos de diversas pilhas agrupadas ligadas em série, quando há necessidade de maior potencial, ou em paralelo, casos em que se busca maior corrente elétrica para o sistema (BOCCHI, FERRACIN, BIAGGIO 2000).

Dessa maneira, é evidente que para entender o funcionamento das baterias, é necessário analisar os conceitos químicos presentes nas pilhas, sendo elementos construídos a partir de dois eletrodos: um ânodo, material que sofre reações eletroquímicas de oxidação, isto é, perda de elétrons, e um cátodo, que por sua vez, sofre reações de redução, ou seja, ganho de elétrons. Os eletrodos são imersos em um eletrólito, e quando o sistema é conectado num sistema elétrico (como por exemplo, um aparelho eletrônico), é gerada uma corrente elétrica (BOCCHI, FERRACIN, BIAGGIO 2000).

### 5.1 FUNCIONAMENTO DAS BATERIAS DE LÍTIO DE EVS

Entre os diversos tipos de bateria que foram criadas na história, pode-se destacar as de lítio, visto que surgiram no mercado em 1991 através da Sony e atualmente são as mais utilizadas em diversos tipos de aplicações, inclusive em automóveis elétricos, como citado previamente (NOWAK, WINTER 2017). Esse grande sucesso pode ser atribuído à sua elevada eficiência e densidade energética, longo ciclo de vida, além da ausência da memória de forma, conhecido popularmente como o efeito de “vício da bateria” e que era presente nos dispositivos mais antigos, onde a capacidade de carga das baterias sofria significativa redução em um curto intervalo de tempo (DING et al., 2018).

As composições químicas e tipos de baterias de lítio serão discutidos a seguir, no entanto, resumidamente, o grafite é o material mais comum para fabricação do ânodo, enquanto o eletrodo é constituído de um sal condutor iônico. Em contrapartida, o cátodo possui maior variedade de composições químicas, sendo o eletrodo que concentra o lítio (Li) e outros metais de alto valor agregado, como cobalto (Co), manganês (Mn), entre outros (NOWAK, WINTER 2017; SKEETE et al., 2020).

O funcionamento das baterias é baseado a partir de reações de oxidação e

redução nos eletrodos, sendo que, elas ocorrem devido ao fenômeno da “intercalação iônica”, onde os íons de lítio ( $\text{Li}^+$ ) são, através do fenômeno da difusão, intercalados nas redes cristalinas do cátodo ou ânodo, dependendo se é um processo de carga ou descarga. Para que a neutralidade de cargas seja mantida é necessário que para cada  $\text{Li}^+$ , um elétron também seja intercalado na rede (CHAGAS, 2006).

Durante a descarga da bateria a difusão dos cátions de lítio ocorre do ânodo para o cátodo, e como consequência, os elétrons são forçados a percorrer o circuito externo, conforme ilustrado na figura 4 (CASTELVECCHI, 2021). No processo de carga os íons ( $\text{Li}^+$ ) e elétrons percorrem o sentido contrário ao da descarga, ou seja, os cátions de lítio se difundem para o ânodo, enquanto os elétrons, realizam o percurso através do circuito externo (CHAGAS, 2006).

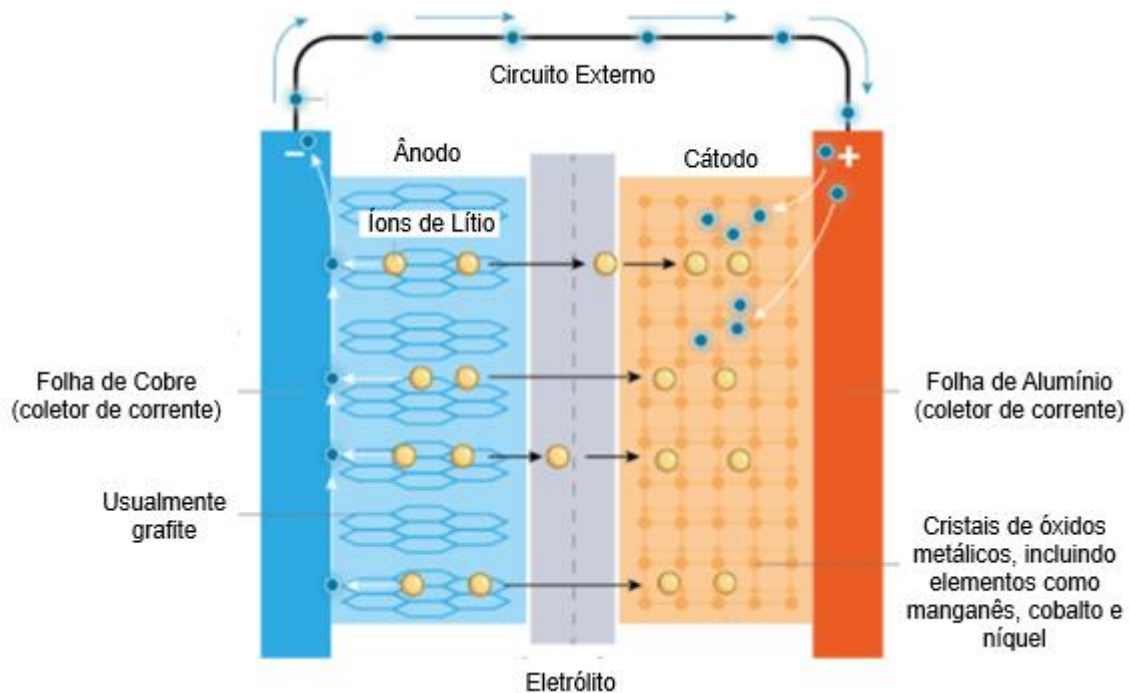


Figura 4: Esquema do funcionamento eletroquímico das baterias de lítio (adaptado de CASTELVECCHI, 2021)

## 5.2 PRINCIPAIS BATERIAS DE LÍTIO DOS CARROS ELÉTRICOS

As composições químicas das baterias utilizadas em carros elétricos são variadas, fator que dificulta a reutilização e reciclagem das mesmas, como será discutido em capítulos futuros deste estudo (SKEETE et al., 2020).

De maneira geral o eletrólito, posicionado entre os eletrodos, é usualmente

um sal condutor iônico, sendo que o  $\text{LiPF}_6$  é o mais presente nesse tipo de aplicação. Por outro lado, os ânodos são comumente fabricados de grafite (NOWAK, WINTER 2017).

Já no caso dos cátodos existe uma maior variedade de materiais aplicados. Apesar de ser comum encontrar cátodos do tipo LCO (óxido de lítio-cobalto) em dispositivos eletrônicos, eles não são adequados para aplicação em carros elétricos, de modo que para esses casos, as composições químicas podem variar conforme descrito a seguir:  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  (LMO),  $\text{LiFePO}_4$  (LFP),  $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$  (NCA) e  $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$  (NMC) (SKEETE et al., 2020).

Com o intuito de maximizar a carga disponível para utilização nos carros elétricos, as baterias são construídas conforme ilustrado na figura 5, onde várias camadas de eletrodos (catodos e anodos) e eletrólitos são combinados formando as células, de modo que existem no formato cilíndrico, prismático ou *pouch* (CASTELVECCHI, 2021).

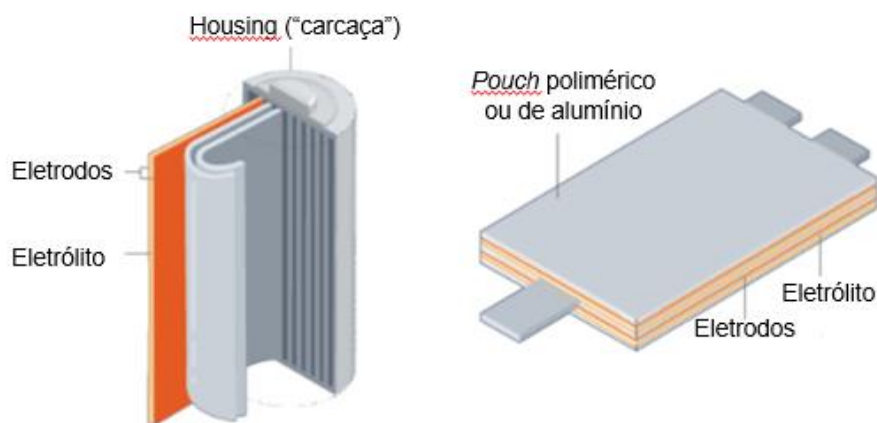


Figura 5: Representação da estrutura das células das baterias de lítio de veículos elétricos (adaptado de CASTELVECCHI, 2021)

Diversas células são unidas para formação dos módulos, e um conjunto de módulo denominado pack é inserido nos automóveis, sendo os responsáveis por fornecer energia aos carros elétricos. Vale ressaltar que os pesos totais das baterias variam entre modelos e montadoras, no entanto é estimado que cada *pack* de baterias de lítio pode conter aproximadamente 8kg de lítio, 35kg de níquel, 20kg de manganês e 14kg de cobalto, sendo metais de considerável valor agregado e que estão concentrados principalmente nos cátodos das baterias (CASTELVECCHI, 2021).



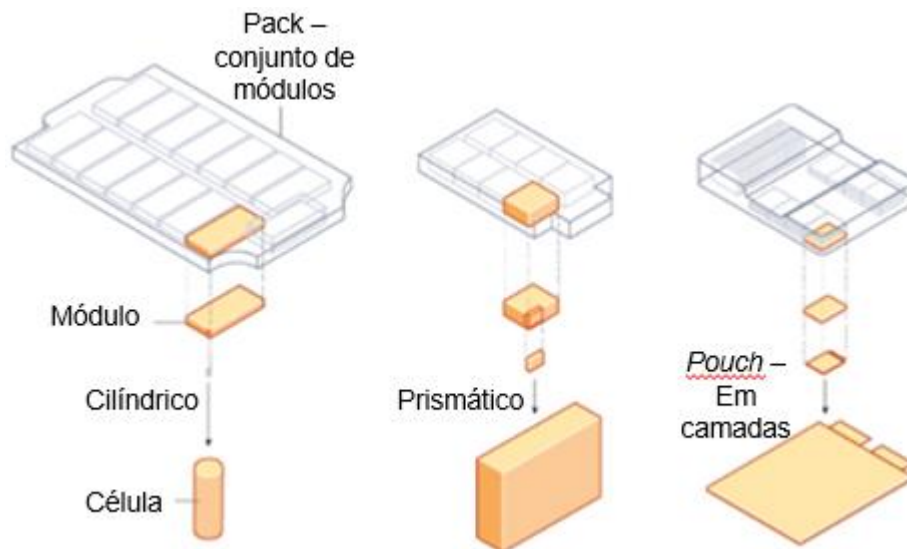


Figura 6: Representação dos tipos de módulos e packs de baterias utilizadas em carros elétricos (adaptado de CASTELVECCHI, 2021).

## 6. IMPACTOS AMBIENTAIS, SOCIAIS, E ESCASSEZ DE MATÉRIA PRIMA

Apesar dos veículos elétricos serem meios de transporte considerados “limpos” ao meio ambiente devido ao fato de não liberarem gases que contribuem para o aquecimento global, é necessário analisar outros possíveis impactos ambientais que podem ser gerados por eles.

Uma vez que o foco desse trabalho são as baterias de lítio, será discutido aqui os riscos existentes relacionados à sua produção e mau descarte, além da disponibilidade de minérios e possíveis consequências da mineração para obtenção das matérias primas.

Como discutido anteriormente, as baterias de lítio utilizadas em carros elétricos possuem variadas composições, de modo que diversos elementos químicos podem estar presentes, no entanto, as maiores preocupações em relação a escassez de matéria prima estão relacionadas ao lítio (Li) e Cobalto (Co), uma vez que elementos como níquel (Ni), manganês (Mn), alumínio (Al), e grafite são mais abundantes na crosta terrestre e possuem significantes volumes produtivos já bem estabelecidos ao redor do mundo (DING et al., 2019).

### 6.1 LÍTIO

O lítio (Li) é o 33º elemento mais abundante na crosta terrestre, sendo considerado um metal relativamente escasso e que pode ser encontrado em diversos minérios (não é encontrado na forma metálica na natureza), sendo as salmouras e rochas conhecidas por pegmatitos os principais tipos de depósitos possíveis de serem explorados com as tecnologias e processos que existem atualmente (LOPES, 2019).

As maiores reservas são localizadas principalmente na Bolívia, Argentina, Chile e Austrália, sendo que de acordo com dados publicados no US Geological Survey o volume mundial estimado de lítio em 2021 foi de 21000kt.

Realizar estimativas sobre até quando esse volume disponível de lítio será suficiente não é algo trivial, uma vez que depende de diversos fatores, como real crescimento do número de veículos elétricos num futuro próximo, possibilidade de descobertas de novas jazidas (aumentando a abundância conhecida do material no mundo), reciclagem, criação de novas tecnologias de mineração, desenvolvimento de outras tecnologias de baterias, e etc (CASTELVECCHI, 2021). Apesar de todas

variáveis, existem estudos que tentaram estimar tal fenômeno.

Um dos estudos foi realizado por Jamie Speirs et al. em 2014, buscando prever a relação entre demanda e fornecimento disponível de lítio para baterias até o ano de 2050, conforme ilustrado na figura 7 abaixo que foi adaptada do artigo em questão. Vale ressaltar que o crescimento brusco previsto entre os anos de 2030 e 2050 foi calculado considerando principalmente o aumento na frota de carros elétricos e híbridos (SPEIRS et al., 2014).

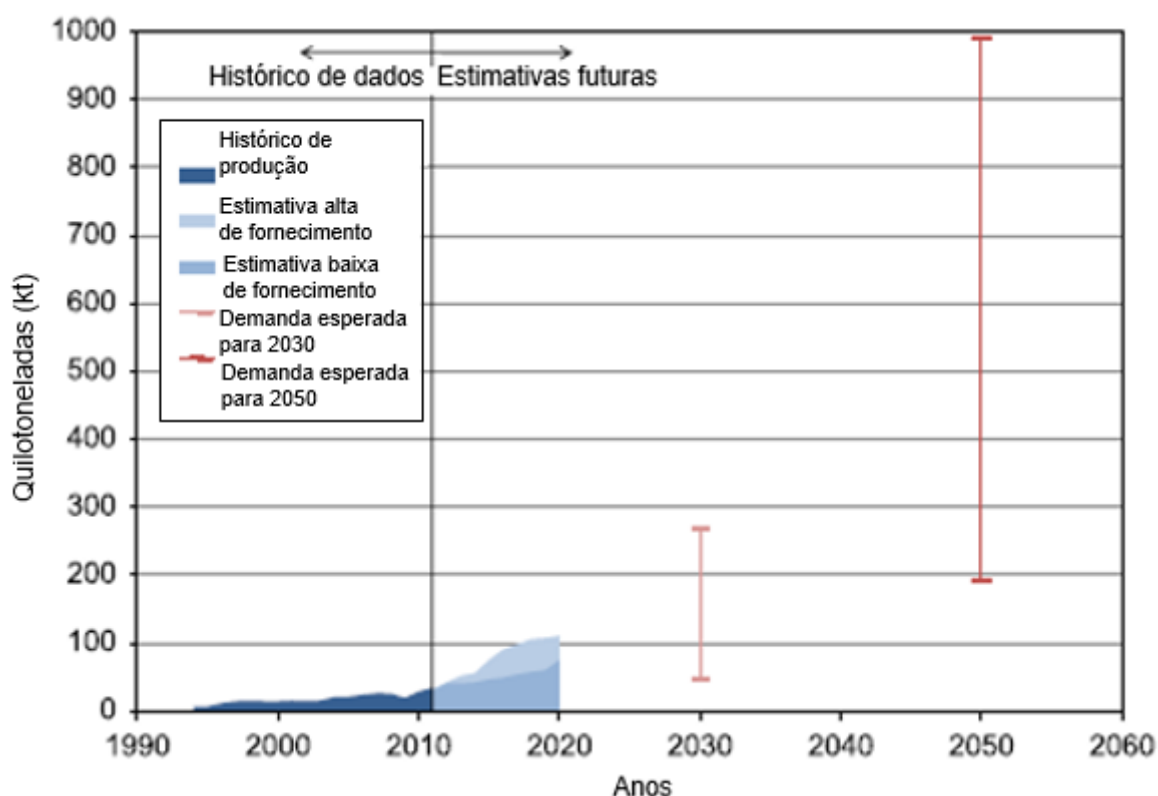


Figura 7: Estudo de 2014 em relação à produção e fornecimento de lítio até 2020, e estimativa de fornecimento e aumento significativo na demanda de lítio para os anos de 2030 e 2050 (adaptado de SPEIRS et al., 2014)

O gráfico foi construído considerando dois cenários: estimativa alta (110 kt) e baixa de capacidade de fornecimento (75 kt) de lítio até o ano de 2020 (SPEIRS et al., 2014). Esses valores que foram estimados em 2014 podem ser considerados coerentes, uma vez que de acordo com o US Geological Survey, em 2020, apesar das dificuldades produtivas impostas pela pandemia da Covid-19, a produção mundial real de lítio foi de 82 kt.

Como comentado anteriormente, são diversas variáveis e incertezas em

relação ao futuro de lítio em termos de abastecimento para fabricação de baterias, no entanto, o gráfico traz grandes preocupações acerca desse assunto, visto que em 2030 a demanda esperada é de aproximadamente 250 kt, quase o triplo da capacidade produtiva real de 82 kt encontrada em 2020 - valor retirado do US Geological Survey (SPEIRS et al., 2014).

Por outro lado, há relatos mostrando que o volume total de lítio disponível de 21Mton para ser explorado é o suficiente para atender a demanda até meados desse século, e além disso, há expectativa de que novas tecnologias de exploração e produção irão aumentar a capacidade de fornecimento de lítio em até 7 vezes ao final de 2030 (CASTELVECCHI, 2021).

Entretanto, mesmo que seja possível atender a demanda de lítio no futuro e o material não se torne escasso na crosta terrestre, os métodos de obtenção do metal trazem consigo algumas preocupações ambientais. Conforme citado previamente, existem dois tipos principais de depósitos que são explorados: salmouras e pegmatitos (LOPES, 2019). Os métodos de exploração das salmouras e pegmatitos são distintos entre si, e os detalhes sobre cada processo não será abordado, já que fogem do escopo desse projeto.

É válido ressaltar, porém, que as extrações de lítio a partir das salmouras ocorrem geralmente em regiões áridas, e o processo requer o uso de 5 a 50 m<sup>3</sup> de água para cada tonelada de bateria de lítio do tipo LiCO<sub>3</sub>, levantando questões sobre falta de água a longo prazo, apesar de não existir um consenso sobre o fato até o momento (FLEXER, BASPINEIRO, GALLI 2018). Além disso há preocupações sobre geração de resíduos e quais os possíveis impactos da mineração para a fauna e flora existentes nas regiões dos depósitos explorados (FLEXER, BASPINEIRO, GALLI 2018). Já em relação aos pegmatitos, deve-se considerar o elevado gasto energético durante o processo de mineração para obtenção do lítio (CASTELVECCHI, 2021).

## 6.2 COBALTO

Assim como o lítio, o cobalto (Co) é um importante constituinte das baterias de lítio (tanto de veículos elétricos, quanto dispositivos eletrônicos, smartphones, notebooks, etc.), além de também ser considerado um metal escasso na crosta terrestre. Segundo dados publicados no US Geological Survey, a disponibilidade desse elemento em 2021 correspondia a aproximadamente 25000kt. Esse material

é obtido principalmente como subproduto da mineração de cobre e níquel (HEIDER, 2018).

Devido ao fato do cobalto ser aplicado nas baterias de lítio, é esperado que a sua demanda aumente significativamente nas próximas décadas, acompanhando a tendência de crescimento do mercado de automóveis elétricos. Além disso, conforme a figura 8 abaixo traduzida do relatório *'State of the Cobalt market'* publicada pelo Cobalt Institute, o volume total de cobalto consumido em 2020 foi de aproximadamente 120kt.

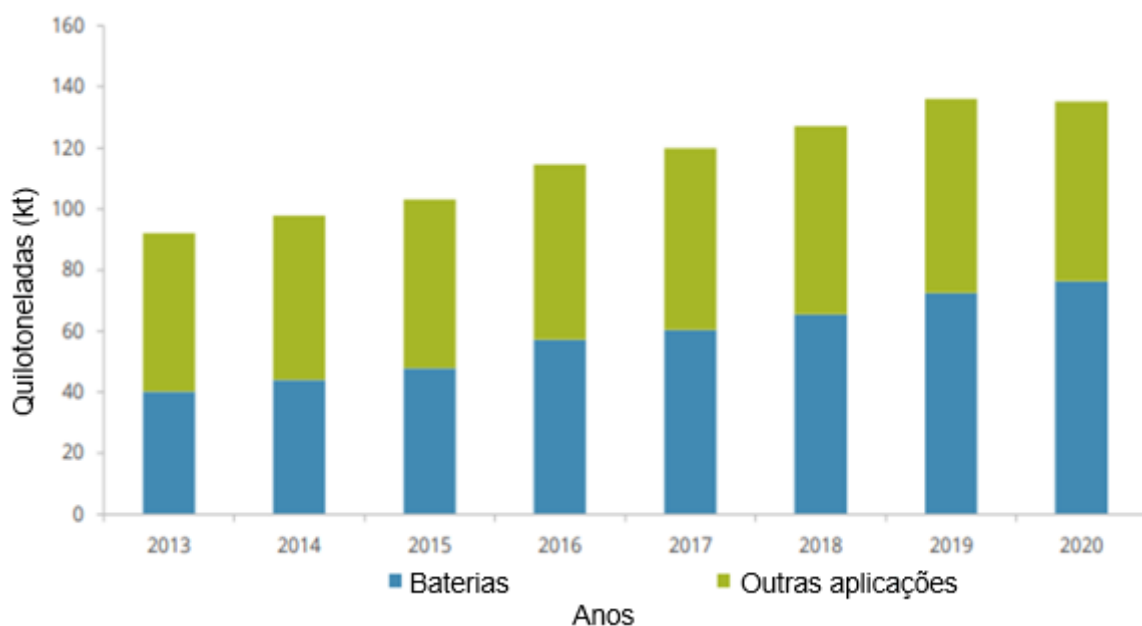


Figura 8: Consumo, por aplicação, de cobalto entre 2013 e 2020 (kt). Observa-se a relevância das baterias no consumo de cobalto (adaptado de [www.cobaltinstitute.org](http://www.cobaltinstitute.org))

Como comentado anteriormente no caso do lítio, as diversas variáveis existentes fazem com que seja complicado realizar estimativas precisas; e nesse contexto, há estudos que sugerem um aumento de 5 a 10 vezes na demanda de cobalto até 2050 (BRINK, 2020).

Esse aumento é preocupante para o futuro abastecimento de cobalto ao redor do mundo pelo seguinte motivo: as minas e fábricas de refino desse metal são concentradas, respectivamente, na República Democrática do Congo (RDC) e China, o que aumenta a vulnerabilidade da cadeia, uma vez que uma ruptura no processo produtivo desses países poderia afetar o abastecimento em escala global

(BRINK, 2020). Em relação à mineração, somente a RDC foi responsável por fornecer mais de 60% do volume mundial de cobalto, correspondendo a um volume de 95 kt (PISTILLI, 2021).

Somado ao risco de escassez, a exploração de cobalto traz consigo profundos riscos ambientais e à saúde na República Democrática do Congo. Como retratado no relatório “Cobalt Blues”, há registros de empresas de mineração atuando em áreas de preservação ambiental, e como consequência, trazendo ameaças à fauna e flora local, além de pesquisas apontando indícios que empresas mineradoras vêm despejando resíduos industriais diretamente nos rios locais, afetando direta e negativamente a pesca e qualidade da água utilizada para agricultura e consumo local (SCHEELE, HAAN, KIEZEBRINK 2016).

A mineração de cobalto na RDC também é associada a problemas sociais, visto que há empresas localizadas próximas de cidades e vilarejos, fazendo com que os moradores locais sejam expostos a fumaças, poeiras e gases nocivos à saúde humana, podendo causar, por exemplo pneumoconiose por exposição a metal duro - doença pulmonar gerada por inalação de cobalto (SCHEELE, HAAN, KIEZEBRINK 2016).

Além dos impactos ambientais e de saúde pública, aspectos sociais também devem ser analisados na exploração de cobalto na RDC, uma vez que existem locais de mineração artesanal com condições de trabalhos que infringem diversos direitos humanos, como trabalho infantil e casos de regime de semiescravidão (SCHEELE, HAAN, KIEZEBRINK 2016).

Nesse contexto, tendo em vista o risco de abastecimento, além dos diversos problemas associados à exploração de cobalto, é importante procurar alternativas para obtenção desse material, como por exemplo, a reciclagem do mesmo.

### 6.3 IMPACTOS AMBIENTAIS DAS BATERIAS DE LÍTIO

Foi citado previamente nesse projeto sobre a expectativa de que o volume de baterias cresça de maneira exponencial. Como consequência, será gerado também um grande número de resíduos provenientes de dispositivos que serão retirados de EVs nos próximos anos. Segundo estimativas, é esperado que em 2030 exista um total de 100-200GWh de energia em baterias que não atendam a especificações de montadoras (ZHU et al., 2021).

Esse volume expressivo de baterias que serão retiradas de veículos elétricos,

apesar de ainda possuírem capacidade de armazenar carga, se dá pelo fato de que esses dispositivos de armazenamento de energia devem, por uma convenção introduzida em 1996 pelo United States Advanced Battery Consortium (USABC), ser substituídos assim que a capacidade de carga seja reduzida em 20%, isto é, armazene 80% da capacidade original (ZHU et al.,2021).

Além disso, modelos da primeira geração de carros elétricos estão alcançando os 10 anos de lançamento, ou seja, o fim da vida útil dessas baterias para aplicações em veículos está se aproximando, contribuindo para a expectativa do grande volume de dispositivos a serem descartadas em breve, como o caso do Nissan Leaf que foi lançado em 2010 (SKEETE et al., 2020).

Sendo assim, é importante avaliar quais impactos ambientais as baterias de lítio podem causar ao longo de todo seu ciclo de vida, isto é, desde a mineração das matérias primas até o descarte. Entretanto, é válido ressaltar que esse estudo não é trivial, uma vez que existem diversos tipos de baterias, capacidades de carga e novas tecnologias surgindo no mercado, dificultando uma análise mais abrangente sobre o assunto.

Nesse contexto, é mais comum encontrar estudos na literatura que priorizem as baterias mais utilizadas no mercado, como por exemplo, a pesquisa realizada por DAI, Qiang et al., onde buscou-se quantificar os impactos ambientais causados pelas diversas etapas de produção das baterias do tipo NMC111 ( $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$ ), sendo a mais comum nos Estados Unidos, Europa e Japão (DAI, Qiang et al., 2019). Os levantamentos foram realizados em termos de gasto energético, emissão partículas (PM), de gases  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ , gases do efeito estufa (GHG) e uso de água para fabricação de 1kWh de bateria (DAI, Qiang et al., 2019).

Conforme mostrado na figura 9, a etapa de obtenção do pó de NMC111 é aquela que demanda mais energia, além de ser a principal fonte de emissão de gases poluentes (GHG,  $\text{SO}_x$  e  $\text{NO}_x$ ). Isso acontece, pois é necessário reagir as matérias primas  $\text{NiSO}_4$ ,  $\text{MnSO}_4$ , and  $\text{CoSO}_4$ ,  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  em uma sucessão de métodos industriais, como co-precipitação e calcinação, que não serão descritos devido ao escopo do projeto, no entanto, são onerosos energeticamente (DAI, Qiang et al.,2019).

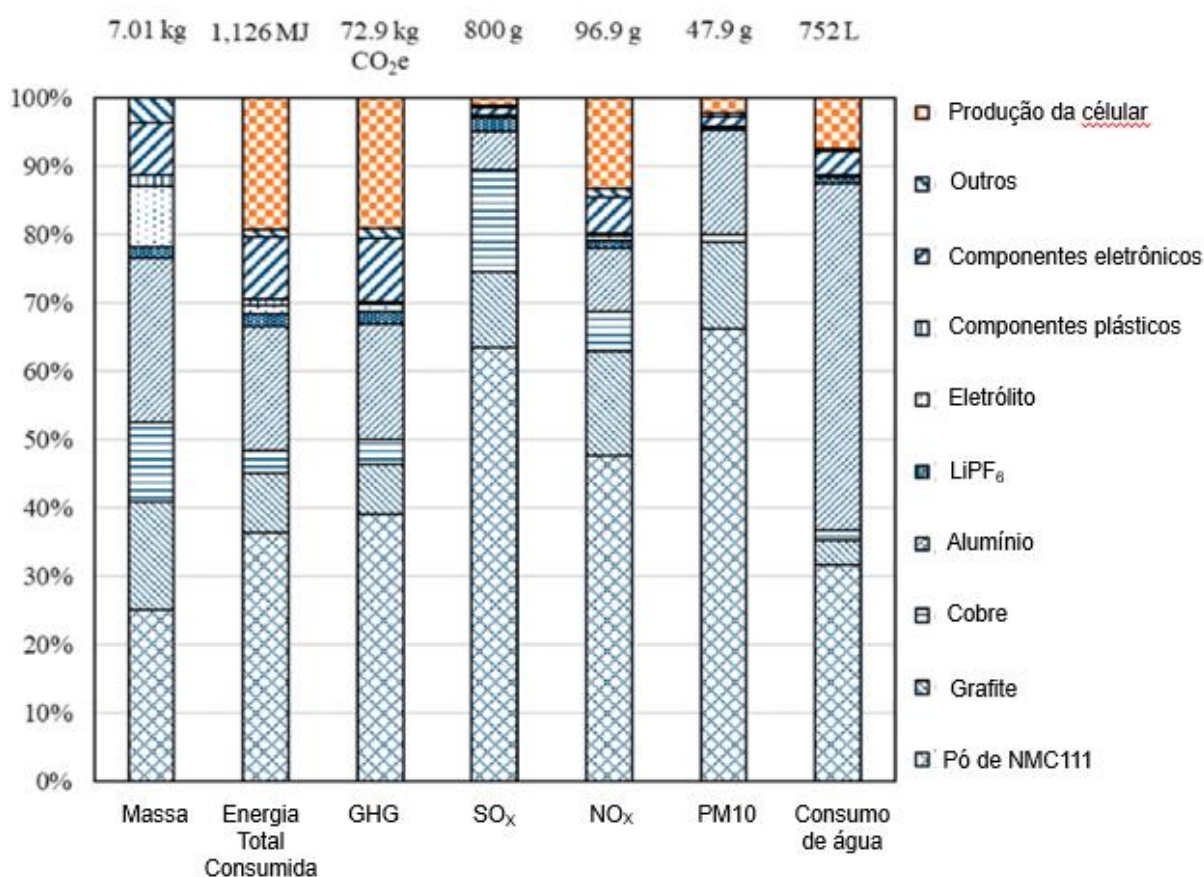


Figura 9: Estimativa do impacto ambiental proveniente das diferentes etapas da produção de baterias do tipo NMC111 (adaptado de DAI, Qiang et al., 2019)

Por sua vez, o alumínio, devido ao fato de ser obtido através da bauxita no Processo Bayer, também possui um significativo gasto energético, além de gerar o resíduo conhecido como Lama Vermelha, ou seja, contribui significativamente para os impactos ambientais.

Além disso, as baterias de lítio são conhecidas por causarem problemas no processo de descarte, uma vez que são consideradas resíduos tóxicos (podendo causar contaminação do meio ambiente), e apresentam riscos de combustão (ZHU et al., 2021).



## 7. REUTILIZAÇÃO E RECICLAGEM DE BATERIAS DE LÍTIO DE CARROS ELÉTRICOS

Como discutido no item anterior, as diversas etapas do ciclo de produção das baterias de lítio possuem potenciais de causar diferentes impactos ambientais e sociais, isto é, desde o processo de extração de matérias prima até o descarte do produto final.

Nesse contexto, e considerando especialmente o expressivo volume de baterias esperado para os próximos anos, faz-se necessário buscar medidas que possibilitem mitigar os impactos em questão.

Sendo assim, existem algumas alternativas conhecidas atualmente para minimizar esses problemas ambientais, e alguns destes processos serão discutidos a seguir.

### 7.1 REUTILIZAÇÃO DAS BATERIAS DE LÍTIO

Conforme citado, o fim da vida das baterias de lítio nos carros elétricos ocorre quando a capacidade de carga do dispositivo atinge aproximadamente 80% do valor original, ou seja, é reduzida em 20%. Nesse momento, existem cinco possíveis destinos para a bateria: restauração, reciclagem (que será abordado posteriormente), incineração, descarte e reutilização, que será o foco deste capítulo (ZHU et al., 2021).

Com exceção da reutilização, todos os outros procedimentos resultam no fim da vida da bateria. No caso da incineração, os materiais presentes nas baterias são utilizados como combustíveis para queima, processo que apresenta riscos de emissão de gases tóxicos, enquanto o descarte, apesar de ser considerada a opção menos eficiente energeticamente, é necessária em certas situações, uma vez que os outros métodos podem expor os trabalhadores a riscos devido às substâncias presentes nas baterias (ZHU et al., 2021).

O processo de restauração baseia-se na desmontagem por completo das baterias de lítio, de modo que os materiais presentes nos cátodos são restaurados e aplicados diretamente na produção de novas baterias, isto é, sem necessidade de processamentos adicionais (ZHU et al., 2021).

Diferente dos quatro métodos citados, a opção de reutilização das baterias de lítio (também conhecida como *second-life applications*) que atingiram o fim da vida

para aplicações em carros elétricos (ou seja, atingiram 80% a capacidade de carga) estende a vida útil dos dispositivos. Isto ocorre, pois a carga restante nessas baterias são suficientes para atender aplicações que demandam menos energia, especialmente quando considera-se os avanços tecnológicos na produção de baterias de lítio que elevaram consideravelmente a capacidade de carga total (ZHU et al., 2021).

Entre as aplicações mais comuns, pode-se citar: bicicletas elétricas, reutilização direta, reconstrução de packs de bateria, e *Stationary energy storage* (estações de armazenamento de energia), isto é, baterias utilizadas para armazenamento de energia solar e/ou eólica, assim como para aplicações residenciais e em iluminação urbana (MELIN, 2021; ZHU et al., 2021).

Vale considerar, porém, que a opção de reutilização não é possível de ser aplicada em todos os casos, uma vez que diversos fatores podem levar à troca de baterias de veículos, como por exemplo, defeitos, danos causados por acidentes, etc. Além disso, é necessário avaliar a viabilidade econômica e ambiental do processo.

### **7.1.1 Etapas do Processo de Reutilização das Baterias de Lítio**

O objetivo final do processo de reutilização é, a partir do nível de exigência da aplicação e estado físico das baterias, desmontar e reagrupar os dispositivos em célula, módulo ou pack, e assim, promover um novo uso para as baterias que seriam inicialmente descartadas (MELIN, 2018). Entretanto, a realização desse procedimento envolve diversos desafios técnicos e de mão de obra que serão abordados a seguir.

O primeiro passo trata-se da retirada das baterias dos veículos elétricos, processo realizado usualmente com o auxílio de no mínimo duas pessoas e utilização de ferramentas e maquinários. Os responsáveis pela operação devem ser trabalhadores treinados e capacitados, visto que há riscos associados às substâncias tóxicas e elevada voltagem nas baterias de lítio (HARAM et al., 2021).

Uma vez que as empresas que atuam com o processo de reutilização recebem as baterias extraídas dos veículos elétricos, é necessário que 5 etapas sejam realizadas para obter baterias que atendam às possíveis novas aplicações, sendo elas (ZHU et al., 2021):

- 1- Avaliação das baterias retiradas dos carros elétricos

- 2- Desmontagem da bateria em células, módulos ou packs
- 3- Avaliação do desempenho mecânico, eletroquímico e de segurança
- 4- Classificação e reagrupamento de baterias
- 5- Estratégias de Controle e Gerenciamento para reutilização de baterias

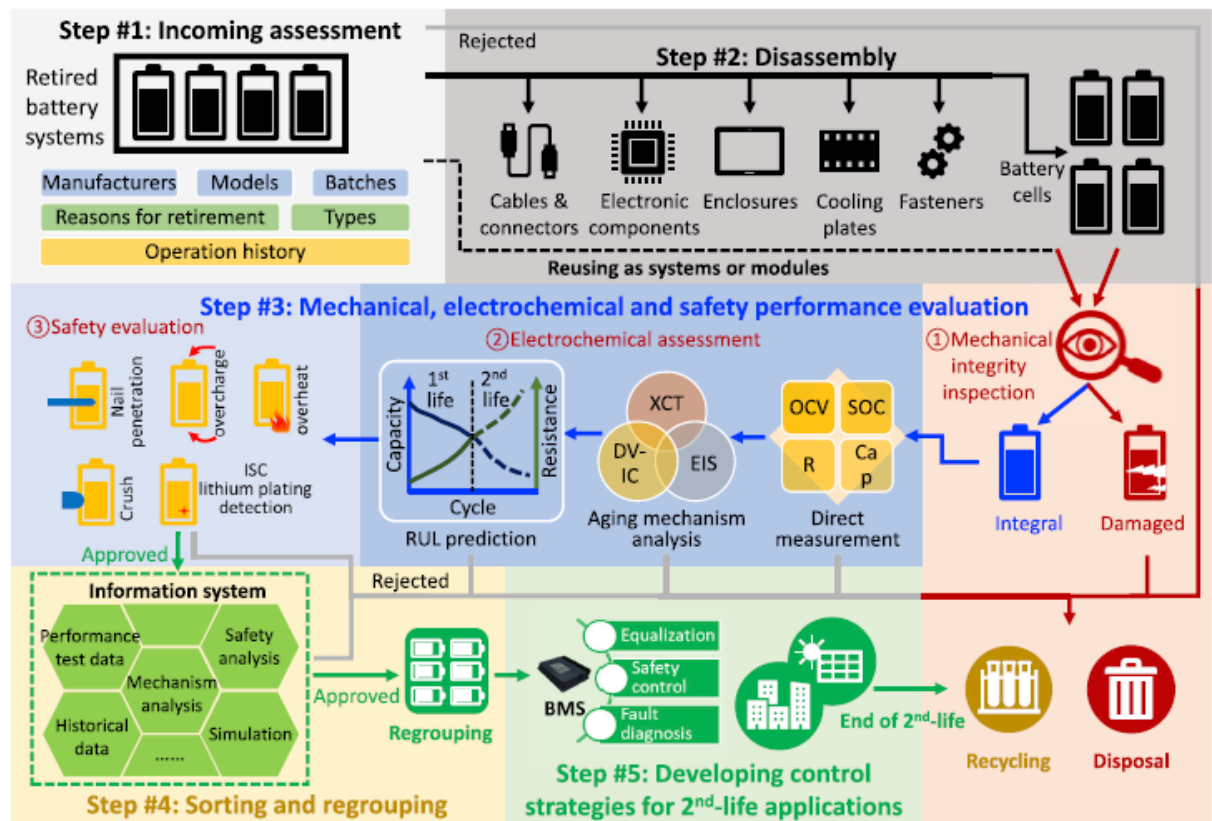


Figura 10: Fluxograma do processo de reutilização das baterias de lítio (Fonte: ZHU et al., 2021)

A primeira etapa (avaliação das baterias retiradas dos carros elétricos) consiste em analisar o histórico da bateria de lítio, e a partir disso, levantar dados relevantes sobre o mesmo, como por exemplo, fabricante, lote, motivo da retirada da bateria do carro elétrico, valores nominais de carga, voltagem, etc. Essa avaliação inicial é importante, pois permite identificar se a bateria possui condições de ser reaproveitada para uma nova aplicação, ou se é necessário seguir com outros destinos, como descarte ou reciclagem (ZHU et al., 2021).

Entretanto, é válido contextualizar dois diferentes cenários: caso a empresa atuando com a reutilização seja a própria montadora ou fabricante da bateria, a obtenção de um grande volume de dados precisos, como vida útil do dispositivo e histórico de manutenção, torna-se um processo simples, facilitando esta etapa. No

entanto, caso seja uma empresa distinta, o acesso à informação pode ser algo trabalhoso e complicado, fazendo com que avaliações adicionais sejam necessárias, e que como consequência, resulta no aumento do custo final (ZHU et al.,2021).

Em seguida inicia-se a segunda etapa, onde as baterias são desmontadas em módulos, células ou packs, dependendo de qual a nova aplicação e o seu nível de demanda energética (ZHU et al., 2021). Esse é um procedimento que pode ser realizado manualmente por pessoas especializadas, ou através de processos automatizados, reduzindo o tempo de trabalho, no entanto, em ambos os casos essa é uma etapa demorada (estima-se que pode levar de 8 a 16 horas, dependendo do nível de desmontagem), além de envolver problemas técnicos que serão abordados a seguir (HARAM et al., 2021). A figura 11 adaptada do estudo feito por Haram et al. mostra estimativas dos tempos necessários para a desmontagem das baterias de lítio retiradas dos carros elétricos.

<b>Tempo estimado para desmontagem das baterias de lítio</b>			
	<b>Bateria</b>	<b>Módulo</b>	<b>Célula</b>
<b>Remoção da bateria do carro elétrico</b>	60 min	60 min	60 min
<b>Avaliação da Bateria</b>	440 min	440 min	440 min
<b>Desmontagem em módulos</b>	N/A	300 min	300 min
<b>Desmontagem em células</b>	N/A	N/A	165 min
<b>Tempo Total</b>	<b>500 min</b>	<b>800 min</b>	<b>965 min</b>

Figura 11: Tempos estimados do processo de desmontagem para diferentes níveis das baterias de lítio, isto é, bateria, módulo e célula (adaptado de HARAM et al. 2021)

Um dos problemas existentes na segunda etapa do processo reside no fato de que existem baterias de lítio projetadas de modo a dificultar a desmontagem das mesmas, uma vez que muitas delas são fabricadas utilizando soldagem ou cola em sua estrutura externa, fazendo com que seja necessária uma intensa mão de obra para obter acesso aos packs, módulos e células, e conseqüentemente, tornando um processo de elevado custo (ZHU et al., 2021). Além disso, existem diversas composições químicas e formatos de bateria, como por exemplo, o cilíndrico,

prismático ou *pouch* (em camadas), dificultando ainda mais o procedimento (ZHU et al., 2021).

Já na terceira etapa busca-se avaliar a integridade e descartar as células danificadas que não possuem condições de atenderem uma nova aplicação, assim como estimar a porcentagem residual de carga presente na bateria (ZHU et al., 2021; HARAM et al., 2021).

Conforme mostrado no estudo feito por Zhu et al., a terceira etapa pode ser separada em análises em termos de integridade mecânica, desempenho eletroquímico e fatores de segurança da bateria. Em relação aos aspectos mecânicos, o intuito é identificar as células danificadas, já que elas podem ser a causa de futuros curtos circuitos, aquecimento excessivo e até explosões. Além disso, vale ressaltar que esse processo é atualmente feito através de inspeção visual por pessoas treinadas, método que possui baixa produtividade, e eleva o custo e risco de erros, além de existir o risco de exposição dos trabalhadores a elementos tóxicos (ZHU et al., 2021).

Uma vez que a integridade física da bateria tenha sido avaliada, inicia-se a verificação dos aspectos eletroquímicos, como por exemplo, voltagem e resistência interna nos diferentes níveis do dispositivo, isto é, packs, módulos e células. Esses resultados permitem determinar se os constituintes da bateria de lítio estão aptos para um novo ciclo de vida, ou seja, se podem ser utilizados numa nova aplicação.

Além disso, nessa terceira etapa é importante avaliar a capacidade de carga residual, assim como verificar o estado de degradação e estimar a vida útil restante da bateria com potencial de ser reutilizada (ZHU et al., 2021; HARAM et al., 2021). A estimativa da vida útil restante (RUL) é um processo que pode ser realizado através de alguns métodos, sendo eles: empírico/semi-empírico, *module-driven*, *data-driven* e híbrido. (HARAM et al., 2021).

Resumidamente pode-se definir que os empíricos são as alternativas mais simples de serem realizadas, visto que não demandam o uso de algoritmos, porém, entregam resultados de baixa precisão (HARAM et al., 2021).

No método *model-driven* utiliza-se o Modelo do Circuito Equivalente (ECM) ou modelos eletroquímicos (EM) associados a algoritmos para estimar a vida útil restante (RUL) da bateria de lítio, permitindo alcançar resultados mais precisos, porém, em contrapartida é um processo mais complexo que requer conhecimento e processamento computacional. Já o *data-driven* requer dados precisos sobre a

utilização das baterias de lítio nos carros elétricos, e como comentado previamente, trata-se de um processo que pode ser complicado, já que o acesso ao histórico não é algo simples de ser obtido; e os híbridos são combinações dos dois métodos (HARAM et al., 2021).

A avaliação de segurança consiste em analisar quais os riscos de segurança existentes nas baterias, uma vez que elas foram aplicadas em condições severas nos automóveis elétricos, levando a complexos processos de degradação. Essa verificação é realizada através de testes térmicos, mecânicos e elétricos. (ZHU et al., 2021).

Após avaliação completa das baterias, inicia-se a quarta etapa, onde células ou módulos são agrupados conforme as características e RUL para formarem as baterias que serão destinadas a novas aplicações. É válido ressaltar que o grande número de variáveis existentes que podem levar à degradação das baterias gera uma grande dificuldade técnica nesta fase: a de desenvolver algoritmos que sejam precisos, rápidos e eficientes em identificar e agrupar as células e módulos compatíveis entre si (ZHU et al., 2021).

Por fim, a última etapa consiste em medidas para minimizar a chance de erros das baterias durante a nova aplicação, onde algumas considerações devem ser realizadas. Conforme citado, na quarta etapa as células e módulos em condições similares são agrupadas para atenderem a nova aplicação, o que reduz o risco de inconsistências a curto prazo, no entanto, a fim de se evitar o mal desempenho a longo prazo, técnicas de equalização ativa são aplicadas, método onde as cargas das células de maior energia são extraídas e distribuídas para as de menor energia (ZHU et al., 2021; COSTA, 2018).

Além disso, deve-se buscar métodos para detecção de riscos de curtos circuitos específicos para baterias reutilizadas, visto que os procedimentos existentes, apesar de serem confiáveis e eficazes, foram desenvolvidos para serem aplicados nos veículos elétricos, onde as condições de uso, assim como da própria bateria, são distintas (ZHU et al., 2021).

### **7.1.2 Viabilidade Econômica**

Para que seja possível realizar uma análise sobre a viabilidade econômica em relação à reutilização das baterias de lítio de carros elétricos, é necessário avaliar os custos envolvidos ao longo dos processos, assim como o preço de novas

baterias de lítio.

Em relação ao preço de novos packs de baterias de lítio, segundo um relatório de 2019 do BloombergNEF, o valor era equivalente a 156 US\$/kWh. Esse custo possui grande tendência de queda, com estimativas mostrando que patamares abaixo de 150 US\$/kWh sejam alcançados nos próximos 5 anos, e menores de 50 US\$/kWh em 2030 (ZHU et al., 2021).

Já o valor de venda para as baterias destinadas à reutilização, calculado a partir da somatória do custo de compra das baterias retiradas dos veículos, custo dos processos de reaproveitamento e margem de lucro, era estimado entre 44 a 300 US\$/kWh em 2019, com expectativa de queda para menos de 43 US\$/kWh em 2030 (HARAM et al., 2021).

Além disso, conforme citado no capítulo anterior, as etapas realizadas na preparação das baterias que serão reutilizadas são de elevado custo, uma vez que envolvem bastante mão de obra. Um dos procedimentos mais onerosos trata-se da desmontagem das baterias, onde o custo médio estimado em 2021 era de \$71 para desmontagem em módulos e \$90 para células, ou seja, atualmente o processo de desagregar as partes desses dispositivos equivale a 45%-58% de uma bateria nova, sendo necessário o desenvolvimento de novas tecnologias para provocar queda nesse preço e tornar as baterias reutilizadas mais competitivas (ZHU et al., 2021).

A relação entre os valores dos dispositivos reutilizados e novos é um fator crucial para o sucesso da reutilização de baterias, uma vez que a viabilidade econômica é determinante para as empresas. Além disso, deve-se considerar que existe um tempo entre o momento em que as baterias de lítio novas são equipadas nos carros, até que as mesmas alcancem seu fim da vida útil no automóvel e sejam destinadas para a reutilização. Durante esse intervalo novos tipos de baterias podem surgir no mercado, levantando questões sobre como as baterias reutilizadas seriam posicionadas nessas circunstâncias (ZHU et al., 2021).

### **7.1.3 Aspectos Ambientais do Processo**

Promover uma segunda utilização para as baterias de lítio retiradas de veículos elétricos resulta na preservação de recursos naturais, uma vez que não será necessário o processo de mineração de lítio e outros elementos que constituem as baterias.

Segundo dados publicados no estudo feito por Haram et al., a obtenção de 1

tonelada de íon de lítio requer 250 toneladas de espodumênio, um tipo de pegmatito, ou 750 toneladas de salmouras de lítio (HARAM et al., 2021).

Apenas volume em si apresenta riscos ao meio ambiente, no entanto, é válido ressaltar a grande demanda energética e aquática para os processos de mineração, onde 1900 toneladas de água são gastas para produzir 1 tonelada de íon de lítio, e 50–65 kWh de energia é consumido para cada 1 kWh de bateria, representando o equivalente a 55kg de emissão de CO<sub>2</sub> caso a energia elétrica seja proveniente da queima de carvão mineral. A reutilização também permite redução no volume de baterias descartadas, uma vez que as mesmas são destinadas a novas aplicações (HARAM et al., 2021).

#### 7.1.4 Difusão Atual do Processo ao Redor do Mundo

Existem projetos envolvendo a reutilização de baterias de lítio sendo realizados por diversas montadora, principalmente as pioneiras na tecnologia dos veículos elétricos. A figura 12 abaixo retirada do relatório “The lithium-ion battery end-of-life market – A baseline study” mostra algumas aplicações desenvolvidas por essas empresas, como backup de energia, time-shift management (onde a bateria carrega quando a energia é mais barata, e descarrega nos momentos de preços elevados), etc (MELIN, 2018)

Montadora	Aplicação para baterias reutilizadas	Montadora	Aplicação para baterias reutilizadas
BJEV	Estação de carga, No-break	PSA	Estação de armazenamento de energia C&I
BMW	Estação de carga e de armazenamento de energia em larga escala	Renault	Estação de carga e de armazenamento de energia em larga escala
BYD	Armazenamento de energia, No-break	Tesla	Remanufatura
Chengan	No-break	Toyota	Estação de armazenamento de energia em larga escala e C&I
Daimler	Estação de carga e de armazenamento de energia em escala industrial e comercial (C&I)	SAIC	No-break
General Motors	Remanufatura	Volkswagen (Audi)	Estação de armazenamento de energia C&I
Great Wall Motor	No-break	Volvo	Armazenamento de energia em escala residencial
Hyundai	Estação de armazenamento de energia em larga escala e C&I	Volvo Cars	Armazenamento de energia em escala residencial
Nissan	Remanufatura, Estação de armazenamento de energia C&I e	Yin-Long	No-break, Estação de armazenamento de energia C&I
Mitsubishi	Estação de armazenamento de energia C&I		

Figura 12: Exemplos de aplicações voltadas para baterias reutilizadas (adaptado de



MELIN, 2018)

Apesar de existirem esses projetos atualmente, o volume de baterias reutilizado ainda é pequeno e concentrado em países onde a tecnologia de veículos elétricos está mais difundida. Nesse contexto, no ano de 2018 foi identificado o equivalente 1GWh de baterias sendo reutilizadas na China, com aplicações voltadas para estações de armazenamento de energia. Já na Europa, o volume potencial alcançou valores de 100MWh, enquanto nos Estados Unidos, somente 10MWh (MELIN, 2018).

### **7.1.5 Vantagens, Desvantagens e Desafios**

A principal vantagem em promover um novo ciclo de vida para as baterias de lítio retiradas de carros elétricos está relacionada à preservação de recursos naturais, redução do volume de descarte, além de ser uma maneira de contribuir para a diminuição da mineração de cobalto, processo que envolve diversos impactos sociais na República Democrática do Congo, conforme descrito anteriormente.

No entanto, para que o sucesso da reutilização desses dispositivos seja alcançado, alguns desafios e desvantagens devem ser considerados, sendo que o custo é a principal barreira que existe atualmente, visto que a etapa de desmontagem das baterias envolve processos manuais que elevam o custo final, ou seja, é necessário a automatização para viabilizar e otimizar o procedimento. Além disso, a tendência de queda no preço das baterias novas é outro fator que deve ser estudado, uma vez que os itens reutilizados devem apresentar valor inferior ao dos itens novos (HARAM et al., 2021).

Outro fator que complica a difusão do processo de reutilização está relacionado à grande diversidade de design utilizados nas células das baterias de lítio (prismático, cilíndrico, pouch) e de composições químicas. A inexistência de um padrão dificulta a etapa de reagrupamento de células e módulos compatíveis entre si, processo crucial antes da montagem das novas baterias (HARAM et al.,2021; ZHU et al.,2021).

## 7.2 RECICLAGEM DAS BATERIAS DE LÍTIO

Uma das alternativas para as baterias de lítio que atingiram o fim da sua vida útil, seja após a extração dos veículos elétricos ou da reutilização (second-life applications), é a reciclagem.

Atualmente existem alguns métodos de reciclagem de baterias, onde o principal foco está na recuperação de metais de elevado valor agregado presentes nos cátodos, sendo que os processos de hidrometalurgia e pirometalurgia são os mais consolidados e serão discutidos a seguir (SKEETE et al., 2020). Vale ressaltar que a recuperação desses metais pode contribuir para evitar a falta de abastecimento futuramente, além de reduzir os impactos ambientais e sociais associados à extração dos minérios.

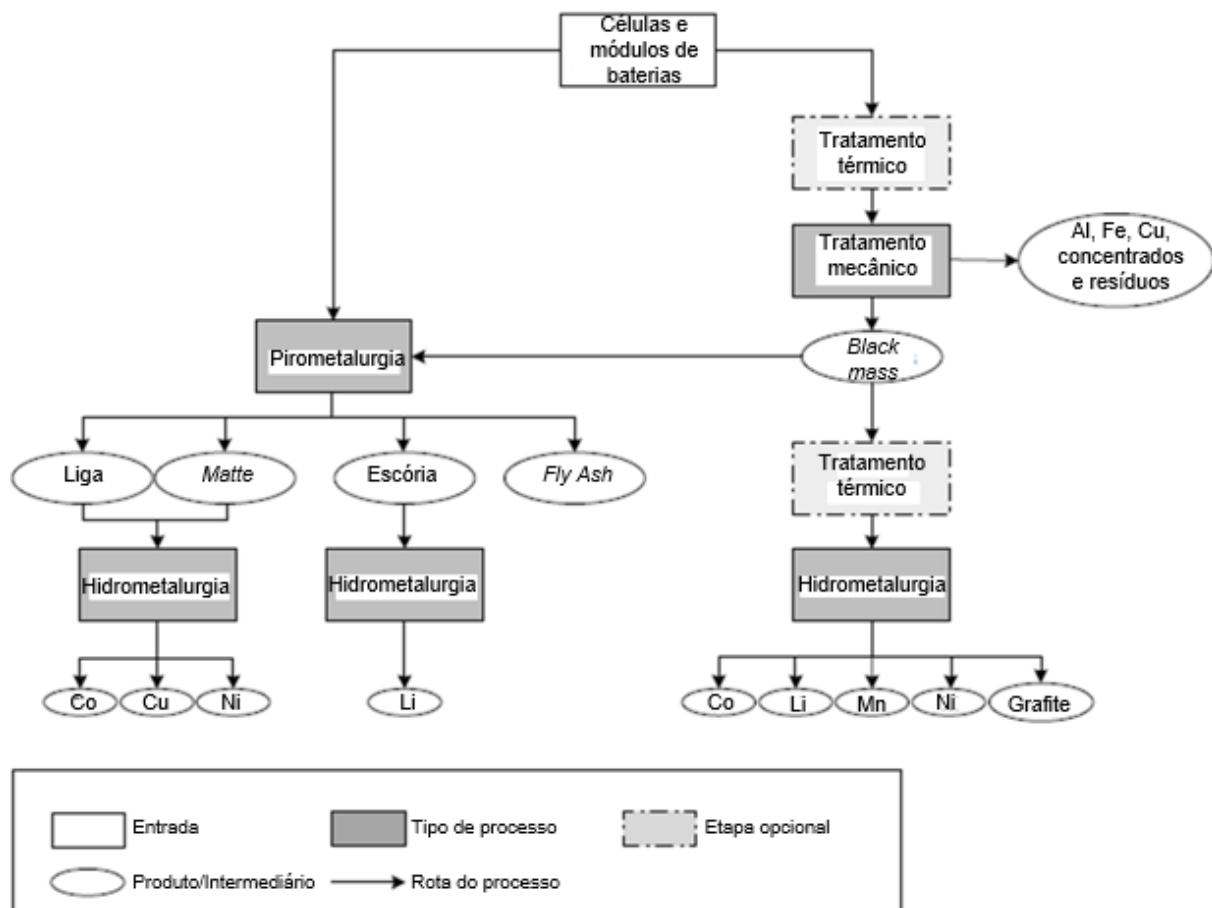


Figura 13: Fluxograma dos métodos de pirometalurgia e hidrometalurgia utilizados para reciclagem de baterias de lítio (adaptado de BRÜCKNER, FRANK, ELWERT 2020)

Existem duas rotas distintas em relação aos processos de reciclagem

aplicados atualmente: aqueles que aplicam métodos hidrometalúrgicos e pirometalúrgicos, e os que são baseados em pré-tratamentos mecânicos, seguidos de processos hidrometalúrgicos, assim como ilustrado na figura 13 (BRÜCKNER, FRANK, ELWERT, 2020).

### **7.2.1 Reciclagem Através da Hidrometalurgia**

O método de reciclagem conhecido como hidrometalurgia consiste na utilização de soluções aquosas para obtenção dos metais presentes no cátodo, onde as diferentes partes da bateria são dissolvidas, e lixiviadas sem a necessidade de altas temperaturas (URIAS, 2017). Entretanto, esse processo requer um pré-tratamento inicial nas baterias de lítio que pode ser classificado em algumas etapas: descarga, desmontagem, cominuição, classificação, separação e dissolução ou tratamento térmico (PRAŽANOVÁ, KNAP, STROE 2022; BRÜCKNER, FRANK, ELWERT, 2020).

O principal intuito do pré-tratamento é o de separar os metais de interesse, principalmente, Co, Mn, Ni e Li, dos materiais que não serão reciclados, como por exemplo, a carcaça da bateria, resinas e coletores de corrente. Essa etapa inicia-se com a descarga das baterias, reduzindo riscos de curtos circuitos ou reações exotérmicas não desejadas. Isso é realizado através da imersão dos dispositivos em um meio aquoso por 24 horas, de modo que água destilada e solução aquosa com 10% em peso de NaOH são as mais comuns (PRAŽANOVÁ, KNAP, STROE, 2022).

Posteriormente as células das baterias são submetidas a um processo manual de desmontagem, seguido pela cominuição, isto é, a moagem dos dispositivos (PRAŽANOVÁ, KNAP, STROE, 2022). Inicia-se então as etapas de classificação e separação, onde os diferentes materiais que compõem as baterias são separados com base nas propriedades físicas, químicas e no tamanho dos fragmentos após a cominuição através de técnicas magnéticas, eletrostáticas, e de correntes parasitas. Dessa maneira, os coletores de corrente, itens ferrosos, não-ferrosos, e uma mistura denominada “black mass” (mistura de interesse, pois concentra os metais dos cátodos) são obtidos (PRAŽANOVÁ, KNAP, STROE, 2022; BRÜCKNER, FRANK, ELWERT, 2020). Composições típicas da “black mass” estão descritas na tabela abaixo (figura 14).

Elemento	Concentrações Típicas [% em massa]
Al	1 - 5
Co	3 - 33
Cu	1 - 3
Fe	0,1 - 0,3
Li	3,5 - 4
Mn	3 - 11
Ni	11 - 26
Grafite	ca. 35
F	2 - 4
P	0,5 - 1

Figura 14: Composições químicas da “black mass”, mistura utilizada na reciclagem de baterias, visto que contém os metais de interesse dos cátodos (adaptado de BRÜCKNER, FRANK, ELWERT, 2020)

As duas últimas etapas – dissolução e tratamento térmicos- são realizadas com o objetivo de eliminar elementos orgânicos da mistura, como por exemplo as resinas que continuam aderidas aos materiais catódicos. Solventes são utilizados durante a dissolução, enquanto o tratamento térmico é realizado em temperaturas próximas de 500°C (PRAŽANOVÁ, KNAP, STROE, 2022).

Após a preparação através do procedimento de pré-tratamento, as baterias podem seguir para a reciclagem através da hidrometalurgia, processo que também pode ser dividido em algumas fases, sendo elas: lixiviação, remoção de impurezas e recuperação de Co, Ni, Mn e Li (PRAŽANOVÁ, KNAP, STROE, 2022).

Durante a primeira etapa ocorre a dissolução dos elementos presentes na “black mass” através de um agente lixiviante, onde tradicionalmente são utilizados ácidos inorgânicos fortes, como por exemplo, ácido clorídrico (HCl), ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) e ácido fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>), e além disso, agentes redutores podem ser utilizados para melhoria do processo. Vale ressaltar que os parâmetros de temperatura, concentração do ácido e agente redutor, tempo de reação e relação entre sólido e líquido devem ser controlados para otimização dos resultados, sendo que essas condições de processo podem variar dependendo do tipo de bateria e agente lixiviante envolvido (MOSSALI et al., 2020).

Segundo um estudo citado por Pražanová, resultados experimentais mostraram que foi possível obter, através utilização de HCl com concentração de

4M a 80°C por 60 minutos, índices de lixiviação superiores a 99% para Co, Ni, Mn e Li; enquanto Mossali et al. mostrou em seu estudo que foi obtido, através de testes em escala piloto, o equivalente a aproximadamente 99% de eficiência na recuperação de Co e Mn para uma solução de 1,75M de HCl a 50°C por 2 horas e com 20% na relação de sólido/líquido (MOSSALI et al., 2020; PRAŽANOVÁ, KNAP, STROE, 2022).

Já em relação ao H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e HNO<sub>3</sub>, suas aplicações como agentes lixiviantes estão associadas à aplicação conjunta de um agente redutor, sendo o peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) o mais estudado e que permitiu alcançar os melhores resultados. No caso do ácido nítrico, foi possível obter taxas de recuperação de até 99% para o Co e Li com a combinação de uma solução de 1M HNO<sub>3</sub>, 1,7% em volume de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, e lixiviação realizada a 75°C por 30 minutos (PRAŽANOVÁ, KNAP, STROE, 2022).

Existem também estudos envolvendo a aplicação de ácidos orgânicos como agente lixiviante, visto que são biodegradáveis, podem ser reciclados e não apresentam risco de contaminação ao meio ambiente. Entre as substâncias estudadas pode-se citar o ácido cítrico (C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>), ácido málico (C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>O<sub>5</sub>) e ácido acético (CH<sub>3</sub>COOH) associados a agentes redutores, no entanto, o uso de ácidos inorgânicos continua sendo mais usualmente aplicado (MOSSALI et al., 2020).

Após o procedimento de lixiviação, inicia-se a segunda etapa de remoção de impurezas, onde ocorre a separação entre o sólido e o líquido através de filtração ou centrifugação, momento onde o processo prossegue para a terceira e última etapa (PRAŽANOVÁ, KNAP, STROE, 2022). Nesse momento, aplicam-se técnicas para obter, no estado sólido, os metais que estão dissolvidos na solução, como por exemplo, cristalização, precipitação seletiva, extração de solvente, técnicas eletroquímicas, etc. Ao final do processo os metais de interesse (Co, Ni, Mn e Li) podem ser obtidos na forma metálica, sal ou hidróxido (PRAŽANOVÁ, KNAP, STROE, 2022; BRÜCKNER, FRANK, ELWERT, 2020).

## **7.2.2 Pirometalurgia Associada à Hidrometalurgia**

A reciclagem através da pirometalurgia baseia-se na utilização de fornos e altas temperaturas, podendo incluir incineração, fusão, pirólise, sintetização, entre outros (URIAS, 2017). Vale ressaltar que ao final do processo pirometalúrgico produtos intermediários são obtidos, sendo necessário submetê-los à hidrometalurgia, onde os metais de interesse são alcançados na forma metálica, sal,

ou hidróxido, como citado no capítulo anterior (BRÜCKNER, FRANK, ELWERT, 2020).

Conforme indicado no fluxograma da figura 13, a reciclagem utilizando a técnica da pirometalurgia pode iniciar-se a partir de dois produtos iniciais: módulos e células de bateria, ou da “black mass” resultante do pré-tratamento mecânico que foi descrito previamente.

Caso o processo inicie-se com as baterias de lítio em si, as etapas de pré-tratamento não são necessárias, no entanto, alguns problemas e dificuldades são encontrados. A presença de flúor (F), alumínio (Al), lítio (Li) e compostos orgânicos nos dispositivos dificulta a inserção dos mesmos nos fornos, uma vez que o F e Li são elementos agressivos aos refratários presentes, o flúor também dificulta no tratamento dos gases que são liberados durante o processo, e além disso, a concentração de alumínio deve ser controlada, pois sua presença resulta no aumento da viscosidade da escória (BRÜCKNER, FRANK, ELWERT, 2020).

Já a utilização da “black mass” é mais vantajosa ao processo, pois apresenta alta concentração de Co e Mn, e durante o pré-tratamento ocorre a separação do alumínio e elementos orgânicos, reduzindo os inconvenientes que ocorrem quando se utiliza as células e módulos de baterias (BRÜCKNER, FRANK, ELWERT, 2020). Entretanto, é válido ressaltar que diferente do método de hidrometalurgia, não é possível obter o lítio a partir da reciclagem através da pirometalurgia (MOSSALI et al., 2020).

O processo da reciclagem até a obtenção dos produtos intermediários pode ser dividido basicamente em três etapas: pirólise, redução metálica e incineração de gases. Devido à necessidade de elevadas temperaturas dos processos, uma das características da reciclagem através da pirometalurgia é a alta demanda energética, além da produção de gases nocivos que devem ser devidamente tratados (MOSSALI et al., 2020).

Durante a pirólise ocorre a degradação térmica dos materiais orgânicos presentes. Em alguns casos realiza-se a calcinação das baterias de lítio antes de adicioná-las aos fornos elétricos, pois nesse processo também é possível obter a redução na concentração de elementos orgânicos, além do flúor e grafite, diminuindo o risco de explosões dentro dos fornos (MOSSALI et al., 2020; BRÜCKNER, 2020).

Já na segunda etapa ocorre a formação de ligas metálicas a partir de agentes

redutores e temperaturas próximas de 1500°C, enquanto a última etapa é voltada para a queima de gases a aproximadamente 1000°C, procedimento que evita a liberação de dioxinas, isto é, subprodutos provenientes do processo (MOSSALI et al., 2020).

Ao final das etapas descritas, os seguintes produtos são obtidos: “matte”, sendo o produto intermediário de interesse que será destinado a processos de hidrometalurgia e concentra principalmente Co, Cu e Ni; e a escória, onde encontra-se o lítio, alumínio e manganês. Além disso, é possível utilizar os elementos orgânicos e grafite como combustível e agente redutor para o processo (BRÜKNER, 2020).

Conforme citado previamente, o Li não é recuperado através da pirometalurgia, e isso ocorre devido ao fato de que sua concentração na escória é baixa, tornando inviável o processo de lixiviação (MOSSALI et al., 2020).

### 10.3 Vantagens e Desvantagens de cada processo

Entre as principais vantagens da reciclagem de baterias de lítio de carros elétricos através das técnicas hidrometalúrgicas, pode-se citar: baixo consumo energético, pois os processos são realizados em temperaturas relativamente baixas, além da elevada eficiência em recuperar, para diversos tipos de bateria, o lítio e outros metais presentes nos cátodos (MOSSALI et al., 2020). Em contrapartida, existem dificuldades no processo, como por exemplo a necessidade de realizar o pré-tratamento (que conforme descrito anteriormente, costuma ser realizado de forma manual), impossibilidade de reciclar os materiais presentes nos anodos, e elevado volume no consumo de água (PRAŽANOVÁ, KNAP, STROE, 2022).

Em relação à reciclagem por processos pirometalúrgicos, algumas das vantagens existentes são: flexibilidade em reciclar vários tipos de bateria sem a necessidade de pré-tratamentos (apesar da “black mass”, que é obtida através do pré-tratamento, possuir vantagens operacionais), alta eficiência e ser um processo mais consolidado na indústria (PRAŽANOVÁ, KNAP, STROE, 2022). Já entre as principais desvantagens estão: impossibilidade de recuperar o lítio, alumínio e materiais orgânicos; alto consumo de energia devido às altas temperaturas requeridas; e geração de gases tóxicos que necessitam de posteriores tratamentos, visto que apresentam riscos de contaminação do ar (PRAŽANOVÁ, KNAP, STROE, 2022, MOSSALI et al., 2020).

### 7.2.3 Aspectos Ambientais e Econômicos

Existem diversas variáveis que podem afetar a viabilidade econômica da reciclagem das baterias, como por exemplo: composição química do dispositivo, tipo de processo utilizado, fatores logísticos, etc.

O fator da composição química reside no fato de que os processos de reciclagem visam, principalmente, a recuperação dos metais de elevado valor agregado que estão presentes nos cátodos. Dessa maneira, baterias com presença de Co, Ni e Li possuem, em termos econômicos, maior interesse em serem reciclados, uma vez que são os elementos com maior preço de venda (BRÜKNER, 2020). Isso é evidenciado na figura 15 abaixo retirado de um estudo realizado por Martin Placek, onde é possível observar que o cobalto, níquel e lítio representaram uma fatia considerável nos preços das baterias recicladas avaliadas em 2020.

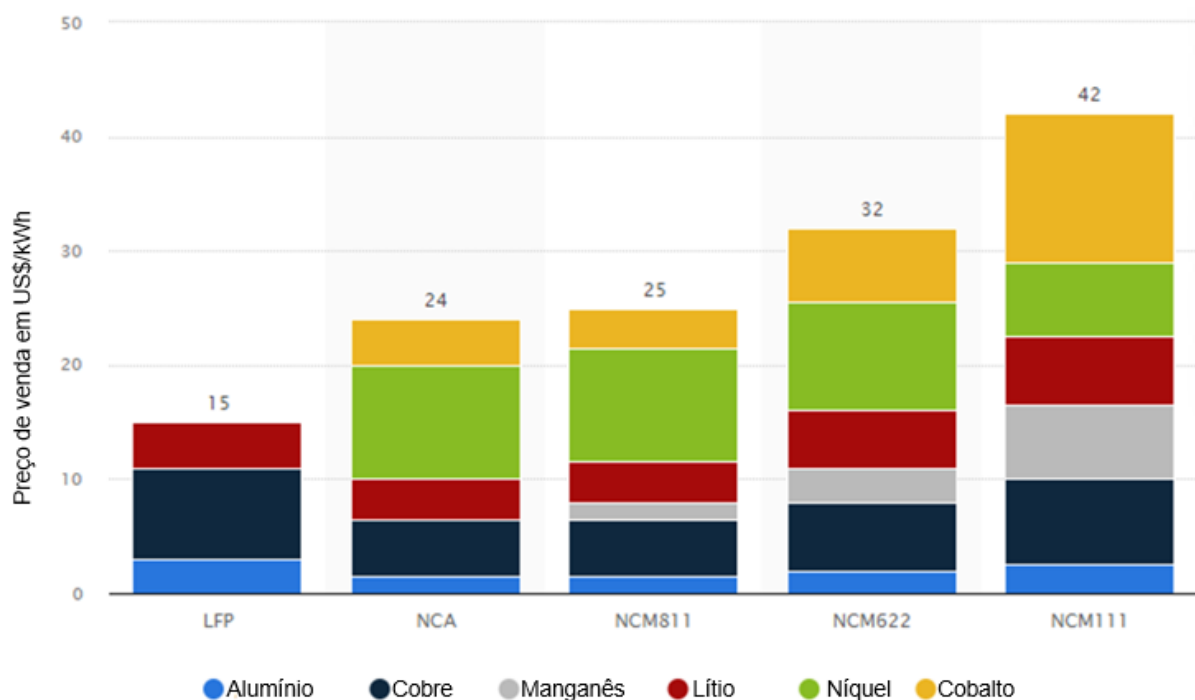


Figura 15: Preço médio em US\$/kWh de baterias de lítio recicladas para diferentes composições químicas (adaptado de PLACEK, 2020)

É importante ressaltar que o cobalto é o elemento mais caro presente nas baterias dos carros elétricos, motivo pelo qual há tendência em eliminar ou reduzir a sua aplicação nestes dispositivos, como no caso das baterias do tipo LFP. Sendo assim, é importante a busca por novos métodos de reciclagem, já que a hidrometalurgia e pirometalurgia não são economicamente viáveis na recuperação



das LFPs atualmente (MOSSALI et al., 2020). Existem estudos sendo realizados para desenvolver meios de reciclagem dessas baterias, como por exemplo, a reciclagem direta, entretanto, não há empresas atuando no segmento, ou seja, apesar de ser um processo promissor, os resultados existentes são provenientes de escala laboratorial ou piloto (PRAŽANOVÁ, KNAP, STROE, 2022).

Já os fatores logísticos estão relacionados aos custos de transporte das baterias utilizadas até os centros responsáveis pela reciclagem. Nesse contexto, é válido ressaltar o exemplo teórico registrado no estudo realizado por Laura Lender, onde foram estimados os custos de transporte de baterias com origem no Reino Unido até empresas de reciclagem localizadas na China, Coréia do Sul, Estados Unidos, Bélgica e próprio Reino Unido (LANDER et al., 2021). Os resultados obtidos na pesquisa mostraram que caso o processo de exportação seja realizado, a reciclagem não seria economicamente viável para nenhum país analisado, independente da composição química da bateria e método de reciclagem, sendo que as taxas existentes tiveram forte influência. (LANDER et al., 2021).

Os custos de processo envolvem as etapas da reciclagem, assim como os métodos em si, isto é, hidrometalurgia ou pirometalurgia, e mão de obra envolvida. Um dos fatores operacionais mais relevantes trata-se do processo de desmontagem das baterias, onde o custo está fortemente relacionado ao modelo da bateria (LANDER et al., 2021).

Para ilustrar esse fenômeno, foi verificado que há variação no custo para desmontagem de baterias provenientes de diferentes modelos avaliados: Tesla Model S, Porsche Taycan e Nissan Leaf, sendo o Leaf o mais oneroso, enquanto o Model S mostrou-se o mais econômico (LANDER et al., 2021).

Além disso, devido à natureza dos processos, a hidrometalurgia apresenta maior custo operacional quando comparada à reciclagem através da pirometalurgia. Vale ressaltar que esses custos são influenciados pela mão de obra envolvida, fazendo com que a China seja, em termos econômicos, um dos locais mais viáveis para a reciclagem (LANDER et al., 2021).

Por fim, pode-se considerar que a reciclagem das baterias de lítio proporciona impactos ambientais positivos, sendo possível obter menor consumo de energia elétrica e redução na emissão de gases responsáveis pelo efeito estufa quando comparado com a manufatura primária. Isso ocorre, pois, a extração de

matéria prima a partir dos minérios envolve alta demanda energética, além de impactar negativamente o meio ambiente (PRAŽANOVÁ, KNAP, STROE, 2022). Entretanto, é válido citar que o tipo e composição química da bateria pode ter influência nesse quesito, tendo, no aspecto ambiental, um maior ou menor impacto positivo (SHU et al., 2021).

## 8. LEGISLAÇÕES AO REDOR DO MUNDO

Considerando a expectativa de aumento no volume de baterias de lítio nos próximos anos associado aos riscos ambientais e de escassez de matéria prima, além dos desafios em implementar a reciclagem e reutilização desses dispositivos, faz-se necessário avaliar a atuação dos governos em relação ao fim da vida útil das baterias. Será descrito nesse estudo as legislações presentes nas regiões onde o mercado de carros elétricos está mais desenvolvido

Em relação aos Estados Unidos, atualmente a reciclagem não é regulamentada e nem obrigatória, entretanto, em 2021 foi promulgada a lei conhecida como *Infrastructure Investment and Jobs Act* (Lei de Empregos e Investimento em Infraestrutura, em tradução livre), onde é previsto o repasse de US\$60 milhões para pesquisas envolvendo reciclagem de baterias de lítio, além de US\$ 50 milhões e US\$ 15 milhões para, financiar programas de reciclagem de governos locais e varejistas, respectivamente. Vale ressaltar que a lei em questão envolve também incentivos a projetos de reutilização de baterias de lítio. (BIRD et al., 2022).

Além disso, existem duas leis importantes nos Estados Unidos que podem afetar a questão da reciclagem: a *Mercury-Containing and Rechargeable Battery Management Act* (Lei de Gerenciamento de Baterias Recarregáveis e Itens Com Mercúrio, em tradução livre), legislação que obriga os produtores e distribuidores de baterias de mercúrio a receber e reciclar os produtos utilizados, sendo que essa lei deve ser utilizada como modelo para a criação de uma lei específica para reciclagem de baterias de lítio; e a segunda trata-se da *“Resource Conservation and Recovery Act”* (Lei de Recuperação e Conservação de Recursos, em tradução livre), regimento que descreve e regulamenta o descarte de produtos não-perigosos e perigosos, categoria que as baterias de lítio se enquadram, uma vez que elas apresentam riscos de incêndios e explosões (BIRD et al., 2022).

No caso da União Europeia, uma nova legislação está prevista para entrar em vigor entre 2022 e 2023, substituindo a vigente que foi introduzida em 2006 e é considerada obsoleta, conforme descrito no artigo “EU Battery Regulation Make New Demands on Industry” da Stena Recycling”.

O novo regulamento *Proposal for a Regulation of the European Parliament and the Council concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020* encontra-se em

desenvolvimento, sendo que o objetivo trata-se de criar meios para alcançar a economia circular das baterias, principalmente as de lítio (Halleux, 2022).

Entre as diretrizes incluídas nessa resolução, pode-se citar a regulamentação sobre as responsabilidades de cada parte envolvida na cadeia produtiva (fabricante, usuário e recicladores); obrigatoriedade dos fabricantes de baterias de lítio em fornecer dados sobre os produtos (como por exemplo, vida útil, capacidade de carga e presença de substâncias perigosas); criação de sistemas de armazenamento de informação, podendo assim, determinar o estado da bateria durante e após o seu uso, a origem das matérias primas utilizadas, assim como o impacto ambiental das mesmas (BIRD et al., 2022).

Além disso, a nova legislação irá trazer a criação de regulamentos para viabilizar os processos de reutilização de baterias de lítio, e gerar necessidade de novas parcerias entre produtores e centros de reciclagem. Existem também medidas tomadas por países específicos dentro da União Europeia, como por exemplo a Alemanha, onde ocorre incentivos financeiros por parte do governo para pesquisas voltadas à reciclagem de baterias de lítio (BIRD et al., 2022).

Já em relação à Ásia destacam-se dois países: China e Japão. No caso do Japão, existem leis vigentes relacionadas às baterias, onde os dispositivos são de responsabilidade das fabricantes, e a reciclagem costuma ser realizada por uma empresa sem fins lucrativos chamada (JBRC – *Japan Portable Battery Recycling Center*) (BIRD et al., 2022).

Por sua vez, as regulamentações das baterias de lítio da China foram construídas com base nas leis relacionadas às baterias de chumbo-ácido, de modo que abrangem informações desde a produção dos dispositivos, até coleta e reciclagem dos mesmos. Além disso, desde 2020 é previsto na lei a suspensão de importações de baterias provenientes de outros países, medida provavelmente tomada devido ao fato de que países europeus e os Estados Unidos exportavam resíduos (como baterias) para serem reciclados na China, devido ao baixo custo de mão de obra existente (BIRD et al., 2022).

## **9. DISCUSSÃO DE RESULTADOS**

Com base nas informações e dados levantados nas seções anteriores deste estudo, é possível realizar algumas considerações acerca dos processos de reutilização e reciclagem das baterias de lítio.

### **9.1 CONSIDERAÇÕES EM RELAÇÃO AO MEIO AMBIENTE**

Foi visto que o volume das baterias de lítio irá crescer exponencialmente nas próximas décadas, e que além disso, apresentam riscos ambientais tanto durante a fase de mineração e produção, quanto após o descarte, já que são consideradas resíduos tóxicos, possuindo potencial de contaminação ao meio ambiente.

Nesse contexto, a aplicação dos métodos de reciclagem e reutilização em larga escala serão fundamentais, uma vez que podem contribuir para mitigar os efeitos ambientais negativos, assim como reduzir riscos de abastecimento das principais matérias primas presentes nos cátodos.

Além disso, o caminho ideal a ser percorrido pelas baterias retiradas dos veículos elétricos é de inicialmente serem reutilizadas para uma outra aplicação, pois isso irá permitir aproveitar a carga residual presente nos dispositivos, estendendo a vida útil do produto, e posteriormente seguir para a reciclagem, onde os metais de elevado valor agregado dos cátodos serão extraídos e destinados para a fabricação de novas baterias, eliminando ou reduzindo a necessidade de mineração desses elementos.

### **9.2 PRINCIPAIS DESAFIOS**

Para que os processos de reciclagem e reutilização possam ser implementados com sucesso ao redor do mundo, será necessário superar alguns desafios existentes no momento, podendo ser separados em dificuldades de processo e barreiras econômicas.

Entre as adversidades relacionadas aos processos, pode-se citar a variedade de modelos e composições químicas de baterias de lítio existentes no mercado automobilístico, fator que aumenta a complexidade das etapas presentes na reutilização e reciclagem, dificultando, por exemplo, a desmontagem dos dispositivos (geralmente realizado de maneira manual) e o reagrupamento de

células (etapa presente no processo de reutilização). A criação de um tipo mais padronizado de bateria facilitaria a reciclagem e reutilização, além de impactar positivamente no custo dos processos.

Outro fator a ser considerado é o custo envolvido nesses métodos, pois conforme visto anteriormente, a existência de etapas manuais e técnicas com alta demanda energética, como a pirometalurgia, encarecem os processos. Soma-se a isso os fatos de que importações de baterias utilizadas podem ser necessárias (procedimento que envolve taxas), e que o custo de baterias irá, provavelmente, sofrer queda nas próximas décadas, fazendo com que a reciclagem e reutilização tornem-se, em muitos casos, economicamente inviável.

Além disso, devido ao seu elevado valor agregado, o cobalto é um dos elementos de maior interesse na reciclagem, no entanto, exatamente pelo alto custo, existe a tendência em desenvolver novas baterias sem a utilização desse metal, o que elevaria ainda mais os desafios em reciclar os dispositivos.

Nesse contexto, será necessária a otimização e automatização das etapas contidas nos processos de reciclagem e reutilização, além do desenvolvimento de técnicas que permitam reciclar baterias com ou sem cobalto em sua composição. Além disso, os governos vão possuir papel essencial para viabilizar a implementação desses métodos, seja através da atribuição de responsabilidades aos produtores, distribuidores e usuários, incentivos a novas pesquisas para o ramo, regulamentações voltadas ao fim da vida útil das baterias, e incentivos financeiros, como por exemplo, abatimento de impostos em baterias recicladas e reutilizadas.

### 9.3 NOVAS TECNOLOGIAS

Apesar das baterias de lítio serem as mais comuns e consolidadas atualmente para aplicações em veículos, é válido ressaltar que existem estudos envolvendo tecnologias alternativas e com potencial em minimizar os riscos de escassez de matéria prima citados neste trabalho.

Entre os exemplos pode-se citar as baterias de sódio, onde estudos em escala laboratorial mostraram que apesar de apresentarem menor densidade energética que as baterias de lítio atuais, os dispositivos possuem velocidade de recarga mais rápida, maior vida útil, potencial de serem mais baratas, além de reduzir drasticamente o risco de escassez de matéria prima, uma vez que o sódio é um dos

elementos mais abundantes na crosta terrestre (WANGCHUK, 2022).

Existem também baterias de magnésio em fase de estudos, onde os resultados mostraram potencial em fornecer maior densidade energética quando comparadas com as baterias de lítio. Além disso, devido ao fato do magnésio ser encontrado em abundância, o preço dessas baterias e risco de falta de matéria prima tendem a ser mais baixos. Em contrapartida, essa tecnologia ainda está em fase inicial de pesquisa, de modo que diversos ajustes e correções precisam ser realizados, como por exemplo, a limitação na velocidade de recarga e vida útil relativamente curta dos dispositivos (SAGOFF, 2022).

Outra alternativa são as células a combustível que funcionam a partir de reações eletroquímicas entre oxigênio e hidrogênio. Entre as vantagens pode-se citar a grande disponibilidade do elemento hidrogênio, e tempo de recarga similar ao dos motores à combustão. No entanto, apesar de ser uma tecnologia já bem desenvolvida, o alto custo dos veículos e falta de infraestrutura atual impedem a aplicação em larga escala ao redor do mundo, conforme citado no artigo *“Hydrogen fuel cells technology – advantages, disadvantages and applications”* de 2021 da Knauf Automotive.

Vale ressaltar que apesar das novas tecnologias em estudo utilizarem matérias primas abundantes na crosta terrestre, o descarte de baterias continuará sendo um problema ambiental a ser considerado, de modo que métodos de reciclagem e reutilização deverão ser aplicados.

## **10. CONCLUSÃO**

A partir deste trabalho é possível concluir que o crescimento esperado no volume de baterias de lítio aplicadas em veículos elétricos traz consigo riscos ambientais e sociais. Esses problemas estão associados aos processos de mineração, produção e descarte dos dispositivos, já apresentam riscos de explosões, além de serem considerados resíduos tóxicos.

Sendo assim, as técnicas de reciclagem e reutilização existentes atualmente se tornam necessárias, pois possuem potencial de mitigar o risco de escassez de matérias primas, assim como reduzir os impactos ambientais causados pelas baterias de lítio.

Entretanto, a variedade de modelos de baterias existentes, e em muitos casos, a inviabilidade econômica, dificultam a aplicação desses processos em larga escala, fazendo com que a atuação de governos no assunto seja algo crucial para possibilitar a implementação das técnicas citadas. Além disso, é preciso também o incentivo a pesquisas para desenvolvimento de novos processos de reciclagem e reutilização, assim como otimização dos já existentes, o que também poderia viabilizar a aplicação ao redor do mundo.



## REFERÊNCIAS

CAREY, Nick; STEITZ, Christoph. **EU proposes effective ban for new fossil-fuel cars from 2035**. Disponível em: < <https://www.reuters.com/business/retail-consumer/eu-proposes-effective-ban-new-fossil-fuel-car-sales-2035-2021-07-14/> >. Acesso em: 01/12/2021.

MORENO, Thiago. **Adeus, gasolina:** estas marcas vão parar de investir nos motores a combustão. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/business/adeus-gasolina-estas-marcas-vaoparar-de-investir-nos-motores-a-combustao/>>. Acesso em: 01/12/2021.

WALTON, Bryn et al. **Electric vehicles:** Setting a course for 2030. Disponível em: <<https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/future-of-mobility/electric-vehicle-trends-2030.html>>. Acesso em: 01/12/2021.

BOMBE, Kushal. **Electric Vehicle (EV) Market Worth \$2,495.4 Billion by 2027, Growing at a CAGR of 33.6% From 2020- Exclusive Report by Meticulous Research®**. Disponível em: <<https://www.globenewswire.com/news-release/2021/05/11/2227050/0/en/Electric-Vehicle-EV-Market-Worth-2-495-4-Billion-by-2027-Growing-at-a-CAGR-of-33-6-From-2020-Exclusive-Report-by-Meticulous-Research.html>>. Acesso em 01/12/2021

VASCONCELOS, Yuri. **A ascensão dos elétricos**. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/a-ascensao-dos-eletricos/>>. Acesso em: 01/12/2021.

Sem autor. **IEA, Global Electric car registrations and market share, 2015-2020, IEA, Paris**. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-electric-car-registrations-and-market-share-2015-2020>>. Acesso em 02/12/2021

CASTELVECCHI, Davide. **Electric cars and batteries:** how will the world produce enough?. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/d41586-021-02222-1>>. Acesso em: 03/12/2021

MELIN, Hans. **The lithium-ion battery life cycle report 2021**, London, v.1, No.1, p. 2-89, dez. 2020

BOCCHI, Nerilso; FERRACIN, Luiz; BIAGGIO, Sonia. **Pilhas e Baterias:** Funcionamento e Impacto Ambiental. Disponível em: <<http://qnesc.s bq.org.br/online/qnesc11/v11a01.pdf> >. Acesso em: 06/12/2021.

DING, Yuanli et al. Automotive Li-Ion Batteries: Current Status and Future Perspectives. **Electrochemical Energy Reviews**, Estados Unidos, v. 2, n.1, p.1 -28, jan.2019.

NOWAK, Sascha; WINTER, Martin. Elemental analysis of lithium ion batteries. **Journal of Analytical Atomic Spectrometry**, [s.l.], v. 32, n. 10, p. 1823-2058, jul. 2017.

CHAGAS, Luciana. **Princípios Físicos e Químicos de Baterias de Íon Lítio**.

Disponível em:

<<https://www.uel.br/cce/fisica/sefis/xisefis/arquivos/resumos/r44.pdf>>. Acesso em: 29/01/2022.

SKEETE, Jean-Paul et al. Beyond the Event horizon: Battery waste, recycling, and sustainability in the United Kingdom electric vehicle transition. **Energy Research & Social Science**, [s.l.], v. 69, p. 15, mai.2020.

LOPES, Morgana. **LÍTIO -- CARACTERÍSTICAS, OCORRÊNCIAS, PRODUÇÃO E USO**. Disponível em: <<https://www.eng-minas.araxa.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/170/2018/05/Morgana-de-Matos-Lopes.pdf>>. Acesso em: 05/02/2022.

JASKULA, Brian. **LITHIUM**. Disponível em:

<<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-lithium.pdf>>. Acesso em: 05/02/2022

SPEIRS, Jamie et al. The future of lithium availability for electric vehicle batteries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Londres, v. 35, p. 183-193, Jul. 2014.

FLEXER, Victoria; BASPINEIRO, Celso; GALLI, Claudia. Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing. **Science of the Total Environment**, v. 639, p. 1188-1204, Out. 2018.

SHEDD, Kim. **COBALT**. Disponível em:

<<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-cobalt.pdf>>. Acesso em: 05/02/2022.

**'State of the Cobalt market' report**. Disponível

em:<[https://www.cobaltinstitute.org/wp-](https://www.cobaltinstitute.org/wp-content/uploads/2021/05/CobaltInstitute_Market_Report_2020_1.pdf)

[content/uploads/2021/05/CobaltInstitute\\_Market\\_Report\\_2020\\_1.pdf](https://www.cobaltinstitute.org/wp-content/uploads/2021/05/CobaltInstitute_Market_Report_2020_1.pdf)>. Acesso em: 05/02/2022.

HEIDER, Mathias. **PERSPECTIVAS DO COBALTO NO BRASIL**. Disponível em:

<<https://www.inthemine.com.br/site/perspectivas-do-cobalto/>>. Acesso em: 05/02/2022.

PISTILLI, Melissa. **Top Cobalt Production by Country**. Disponível em:

<<https://investingnews.com/where-is-cobalt-mined/>>. Acesso em: 05/02/2022.

SCHEELE, Fleur; HAAN, Esther; KIEZEBRINK, Vincent. **Cobalt Blues:** Environmental pollution and human rights violations in Katanga's copper and cobalt mine. Disponível em: <<https://www.somo.nl/wp-content/uploads/2016/04/Cobalt-blues.pdf>>. Acesso em: 07/02/2022.

DAI, Qiang et al. Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications. **Batteries**, v.48, p.15, jun. 2019.

ZHU, Juner et al. End-of-life or second-life options for retired electric vehicle batteries. **Cell Reports Physical Science**, v.2, n.8, p.26, ago. 2021.

MELIN, Hans. **The lithium-ion battery end-of-life market – A baseline study.** Disponível em: <[https://www3.weforum.org/docs/GBA\\_EOL\\_baseline\\_Circular\\_Energy\\_Storage.pdf](https://www3.weforum.org/docs/GBA_EOL_baseline_Circular_Energy_Storage.pdf)>. Acesso em: 08/02/2022.

HARAM, Mohammed et al. Feasibility of utilising second life EV batteries: Applications, lifespan, economics, environmental impact, assessment, and challenges. **Alexandria Engineering Journal**, Selangor, v.60, p. 4517-4536, out.2021.

COSTA, Gustavo. Equalização Ativa da Tensão em Baterias Conectadas em Série, Aplicando o Conversor cc – cc Flyback no Modo de Condução Descontínua. 2018. 203f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Automação e Sistemas). Universidade Federal de Santa Catarina. 2018.

PRAŽANOVÁ, Anna; KNAP, Václav; STROE, Daniel-Ioan. Literature Review, Recycling of Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles, Part I: Recycling Technology. **Energies**, v.15, p. 29, fev. 2022.

BRÜCKNER, Lisa; FRANK, Julia; ELWERT, Tobias. Industrial Recycling of Lithium-Ion Batteries—A Critical Review of Metallurgical Process Routes. **Metals**, v.10, p.29, ago. 2020.

URIAS, Patrícia. Processos de Recuperação de Cobalto e de Lítio de Baterias de Íons de Lítio. 2017. 72f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Uberlândia. 2017.

MOSSALI, Elena et al. Lithium-ion batteries towards circular economy: A literature review of opportunities and issues of recycling treatments. **Journal of Environmental Management**, v.264, p.12, jun. 2020.

PLACEK, Martin. **Value of recycled EV batteries by battery type 2020.** Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/1246828/value-of-recycled-ev-batteries-by->

battery-type/>. Acesso em: 05/03/2022.

LANDER, Laura et al. Financial viability of electric vehicle lithium-ion battery recycling. **iScience**, v.24, n.7, p.13, jul. 2021.

SHU, Xiong et al. Life-cycle assessment of the environmental impact of the batteries used in pure electric passenger cars. **Energy Reports**, v.7, p.2302-2315, nov. 2021.

**Trends and developments in electric vehicle markets**. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021/trends-and-developments-in-electric-vehicle-markets>>. Acesso em: 31/01/2022.

**Lithium Battery Recycling**. Disponível em: <<https://trends.google.com.br/trends/explore?date=2015-01-03%202022-03-03&q=Lithium%20Battery%20Recycling>>. Acesso em: 16/03/2022.

**EU Battery Regulation Make New Demands on Industry” da Stena Recycling**. Disponível em: <<https://www.stenarecycling.com/events/future-of-battery-recycling/eu-battery-regulations-make-new-demands-on-industry-3/#:~:text=The%20EU%20is%20preparing%20tougher,between%20battery%20manufacturers%20and%20recyclers>>. Acesso em: 28/03/2022.

BIRD, Robert et al. The Regulatory Environment for Lithium-Ion Battery Recycling. **ACS Energy Letter**. v.7, n.2, p. 736–740, jan. 2022.

HALLEUX, Vivienne. **New EU regulatory framework for batteries: Setting sustainability requirements**. Disponível em: <[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/689337/EPRS\\_BRI\(2021\)689337\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/689337/EPRS_BRI(2021)689337_EN.pdf)>. Acesso em: 03/04/2022.

WANGCHUK, Rinchen. **40% Cheaper, Fast Charging: Can Sodium-Ion Replace Li-Ion Batteries in EVs?**. Disponível em: <<https://www.thebetterindia.com/272438/sodium-ion-replace-lithium-ion-batteries-in-ev/>>. Acesso em: 22/04/2022.

SAGOFF, Jared. Q&A: **Could magnesium be a battery future? Argonne chemist Brian Ingram weighs in**. Disponível em: <<https://www.anl.gov/article/qa-could-magnesium-be-a-battery-future-argonne-chemist-brian-ingram-weighs-in>>. Acesso em: 22/04/2022.

**Hydrogen fuel cells technology – advantages, disadvantages and applications**. Disponível em: <<https://knaufautomotive.com/hydrogen-fuel-cells-technology-advantages-disadvantages-and-applications/>>. Acesso em: 22/04/2022