

CENTRO UNIVERSITÁRIO SAGRADO CORAÇÃO

VITOR AUGUSTO SOARES

ESTUDO DO DESCARTE SUSTENTÁVEL DE BATERIAS DE LÍTIO E DE
CHUMBO

BAURU

2021

VITOR AUGUSTO SOARES

ESTUDO DO DESCARTE SUSTENTÁVEL DE BATERIAS DE LÍTIO E DE
CHUMBO

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação apresentado na forma de Artigo
Científico como parte dos requisitos para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Química – Centro Universitário Sagrado
Coração. Orientador: Prof. Dr. Marcelo
Telascrea

BAURU

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

S676e	<p>Soares, Vitor Augusto</p> <p>Estudo do descarte sustentável de baterias de lítio (Li) e de chumbo (Pb) / Vitor Augusto Soares. -- 2021. 35f. : il.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Marcelo Telascrêa</p> <p>Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Centro Universitário Sagrado Coração - UNISAGRADO - Bauru - SP</p> <p>1. Reciclagem. 2. Sustentabilidade. 3. Carros elétricos. I. Telascrêa, Marcelo. II. Título.</p>
-------	--

VITOR AUGUSTO SOARES

ESTUDO DO DESCARTE SUSTENTÁVEL DE BATERIAS DE LÍTIO E DE
CHUMBO

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação apresentado na forma de Artigo
Científico como parte dos requisitos para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Química – Centro Universitário Sagrado
Coração.

Aprovado em: __/__/____

Banca examinadora:

Prof. Dr. Marcelo Telascrea (Orientador)

Centro Universitário Sagrado Coração (UNISAGRADO)

Prof. Dr. Herbert Duchatsch Johansen

Centro Universitário Sagrado Coração (UNISAGRADO)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	7
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	8
2.1	Histórico de Veículos Elétricos e Híbridos e Perspectivas Futuras	8
2.2	Baterias: Fundamento Teórico	11
2.3	CLASSIFICAÇÃO DE BATERIAS.....	13
2.3.1	Bateria de Chumbo-Ácido:	13
2.3.2	Bateria de Íon Lítio:.....	14
2.4	Como Funcionam as Baterias nos Carros	16
2.5	Descarte Incorreto e Reciclagem de Baterias.....	18
2.5.1	Bateria de Chumbo:	19
2.5.1	Bateria de Lítio:.....	27
3	METODOLOGIA.....	29
4	DISCUSSÕES	30
5	CONCLUSÃO.....	31
	REFERÊNCIAS.....	31

ESTUDO DO DESCARTE SUSTENTÁVEL DE BATERIAS DE LÍTIO E DE CHUMBO

Vitor Augusto Soares

Graduando em Engenharia Química pelo Centro Universitário Sagrado Coração (UNISAGRADO)
vitoraug.soares@gmail.com

RESUMO

A busca por alternativas renováveis para combustíveis fósseis já é difundida em larga escala pelo mundo nas últimas décadas. Atualmente o debate ambiental busca se alinhar junto com o desenvolvimento econômico e tecnológico para evolução da sociedade sem comprometer os recursos naturais. Os carros híbridos e elétricos estão ganhando popularidade ao longo do século 21 pois sua construção une a comodidade da tecnologia, a diminuição das despesas com combustível e essa busca pela sustentabilidade. Nesse sentido, o aumento da frota desses veículos nos apresenta uma nova problemática, o descarte da bateria, componente que é essencial para o funcionamento desse tipo de veículo. Por se tratar de uma tecnologia relativamente recente, ainda estão sendo desenvolvidas novas formas de reciclagem e reutilização dessas baterias, com base nos padrões que já existem para as baterias de chumbo, que já contam com regulamentação legal para seu descarte e utiliza-se de modelos eficientes como a produção mais limpa e a logística reversa. Desta forma, o ensejo desse trabalho é aproveitar esse mercado que tem perspectivas muito favoráveis para o futuro próximo e a médio prazo, para analisar os tipos de bateria disponíveis atualmente e explorar os métodos de reciclagem que são empregadas pela indústria. Esta pesquisa utilizou-se de artigos de cunho científico para ser elaborada, e, foi possível concluir quais são os melhores métodos para o descarte sustentável das baterias.

Palavras-chave: *Reciclagem, mercado, carros elétricos.*

ABSTRACT

The search for renewable alternatives to fossil fuels is already widespread around the world in recent decades. Currently, the environmental debate seeks to align itself with economic and technological development for the evolution of society without compromising natural resources. Hybrid and electric cars are gaining popularity throughout the 21st century as their construction unites the convenience of technology, lower fuel costs and this quest for sustainability. In this sense, the increase in the fleet of these vehicles presents us with a new problem, the disposal of the battery, a component that is essential for the operation of this type of vehicle. As it is a relatively recent technology, new ways of recycling and reusing these batteries are still being developed, based on the standards that already exist for lead batteries, which already have legal regulations for their disposal and use models such as cleaner production and reverse logistics. Thus, the aim of this work is to take advantage of this market, which has very favorable prospects for the near and medium term, to analyze the types of batteries currently available and explore the recycling methods used by the industry. This research used scientific articles to be elaborated, and it was possible to conclude which are the best methods for the sustainable disposal of batteries.

Keywords: *Recycling, market, electric cars.*

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o mercado de motores elétricos encontra alguns desafios para se consolidar de vez no setor automobilístico. Dentre as mais variadas barreiras, talvez o desenvolvimento de baterias seja o fator mais importante e limitante para alcançar tal objetivo¹.

O mercado de baterias, apesar de obvio, está intimamente conectado com a frota de veículos². De acordo com o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), a frota de veículos nacionais passou de 90.686.936 em 2015, para 107.948.371 em 2020, um aumento de cerca de 19% na sua totalidade³.

Com o advento de novas tecnologias e o aumento da autonomia das baterias a um custo mais acessível, torna-se necessário vislumbrar um novo mercado que está crescendo consideravelmente e irá se ampliar nas próximas décadas. O descarte e a reciclagem corretas das baterias será um assunto vital no desenvolvimento dessas tecnologias. De acordo com pesquisas feitas⁴, estima -se que a demanda por baterias de lítio (Li) para veículos elétricos aumentará cerca de 32,4 % até 2023, quando comparado aos dados obtidos em 2017. Acompanhando o crescimento significativo da demanda por baterias de lítio, um aumento da produção também é observado, impactando diretamente nos custos dos produtos acabados. O preço da bateria por kilowatt/hora sofreu uma queda de cerca de 98% em 2021, quando comparado a dados dos anos 1990.

Nos dias atuais a bateria pode chegar a UU\$140 a unidade. Algumas pesquisas apontam que se o preço chegar a UU\$100 a unidade, a produção de carros elétricos passará a apresentar uma viabilidade econômica muito competitiva em relação aos carros mantidos à combustão⁵.

As baterias automotivas são compostas de materiais altamente nocivos para o meio ambiente, tais como ácidos e metais pesados. Dentre esses metais pesados, destaca-se o chumbo (Pb). Tal metal não é mais retirado do solo para a elaboração das baterias, mas sim de fontes na indústria que advém do mercado secundário, sendo o restante importado de mercados externos⁶.

As baterias de carros elétricos mais modernas e eficientes já utilizam em sua construção o íon de lítio⁷. Estas baterias são largamente utilizadas em celulares e outros dispositivos mais modernos, por exemplo notebooks e, apesar do grande aumento da utilização desse tipo de

bateria na indústria, cerca de 95% das unidades têm seu destino final em aterros e lixões, indo na contramão do apelo ambiental proposto pelo veículo elétrico⁸.

Diante do exposto, este estudo propõe o seguinte questionamento: qual maneira mais adequada e sustentável de se destinar as baterias de lítio e de chumbo?

Objetiva-se neste trabalho apresentar as alternativas existentes para o descarte adequado e reciclagem de baterias de lítio e chumbo e ponderar sobre quais métodos são economicamente viáveis do ponto de vista da sustentabilidade.

Esse trabalho se justifica, pois estima-se que entre 3 a 5 anos se dará o início do descarte de baterias de veículos elétricos, podendo se tornar um passivo ambiental importante. A revolução dos veículos elétricos estimulado pelas políticas de descarbonização do transporte pessoal, objetivam metas globais de redução das emissões de gases de efeito estufa para melhorar a qualidade do ar em grandes centros e este processo vai atingir radicalmente a indústria automotiva. Imaginando as baterias atuais com pesos médios de 250 kg, seus resíduos de embalagens e de metais pesados poderão resultar em cerca de 250.000 toneladas e em meio milhão de metros cúbicos de resíduos descartáveis ao fim de suas vidas. Embora os processos de reutilização e reciclagem atuais possam ajudar, a carga cumulativa de resíduos de veículos elétricos será substancial e estudos de descartes sustentáveis desses materiais oferecem uma alternativa aos imensos impactos ambientais esperados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica deste trabalho de revisão bibliográfica tratara de alguns temas que são essenciais para o seu desenvolvimento: histórico de veículos elétricos e híbridos e suas perspectivas futuras, como funciona uma bateria e os tipos de baterias empregadas nos veículos modernos e finalmente a reciclagem das baterias.

2.1 Histórico de Veículos Elétricos e Híbridos e Perspectivas Futuras

Apesar da crescente popularidade dos veículos elétricos percebida no mundo recentemente, os veículos elétricos não são uma novidade do século XXI, o seu início se deu quase concomitantemente com a chegada dos motores de combustão interna e da invenção de

baterias⁹. Em 1859 foi realizada a primeira demonstração de uma bateria de chumbo e ácido e já em 1881 foi criado o primeiro veículo elétrico que se utilizava da bateria de chumbo e ácido, que viria ser um triciclo, e a partir deste ano até alguns anos após a virada do século, vários veículos que se utilizavam da bateria de chumbo e ácido foram desenvolvidos e também foram sendo descobertas outros tipos de baterias mais eficientes. Thomas Edison observou o potencial de veículos elétricos e pesquisou outros tipos de baterias⁹, como a de níquel-ferro que tinha 40% mais capacidade por unidade de peso que a bateria de chumbo ácido.

Em 1885⁹ foi demonstrada a invenção do motor a combustão interna por Karl Benz e as duas tecnologias foram evoluindo juntas até 1920, quando começa a decadência do mercado de elétricos e a ascensão do motor movido a combustível fóssil. Esse período de 1880 a 1920 é conhecida como a era de ouro para os carros elétricos e híbridos¹⁰. Pode-se citar que em 1903¹¹ a composição da frota de veículos em Nova Iorque era constituída de 4000 veículos, onde 53% eram veículos movidos a vapor, 27% eram veículos de combustão interna e 20% eram veículos elétricos, ou seja, a distribuição de veículos de combustão interna e elétricos tinha uma proporcionalidade parecida, porém alguns fatores foram determinantes para a dominância dos veículos a combustão, entre elas:

- O modelo de produção conhecido como Fordismo que barateou o custo de produção e comercialização do veículo a combustão;
- Em 1920 os EUA já contavam com uma boa malha rodoviária, e para percorrer era necessário um veículo com boa autonomia;
- A diminuição do custo do petróleo com a descoberta de jazidas nos país;
- A facilidade de transporte do líquido e a implantação de postos de reabastecimento de carros a combustão em relação aos de veículos elétricos.

Com esses principais fatores e outras particularidades, o desenvolvimento e comercialização de veículos elétricos foram ficando cada vez menores, até se tornarem quase nulas, sendo apenas utilizados em algumas situações particulares. Como na Inglaterra⁹ em que as vans leiteiras continuaram sendo movidas a eletricidade até os dias atuais, pelo fato delas serem usadas no período da manhã e emitirem poucos ruídos.

Até que me 1963, Rachel Carson, publicou seu livro *Silent Spring*, que é considerado o expoente do debate moderno sobre o meio ambiente. E, a partir deste momento, novos incentivos ao desenvolvimento de carros elétricos começaram a ser mencionados. Até o

momento o mundo tinha a percepção que desenvolvimento econômico e tecnológico andam em vias separadas em relação a conservação ambiental¹³. Logo, foi se escopeando a concepção de

que é possível sim que o progresso tecnológico e econômico pode andar de mãos dadas com a preservação do meio ambiente, o que conhecemos hoje como desenvolvimento sustentável.

“O conceito de desenvolvimento sustentável... É um enfoque de desenvolvimento socioeconômicos orientado para: a satisfação de necessidades básicas; o reconhecimento do papel fundamental que a autonomia cultural desempenha nesses processos de mudança; oferecer um conjunto de critérios para se avaliar a pertinência de ações mais específicas”¹⁴.

A partir de então, o desenvolvimento de motores elétricos e baterias voltaram a se tornar interessante para indústria automotiva. Até então era utilizado chumbo na gasolina e não se utilizavam o catalisador, uma peça que diminui consideravelmente a poluição emitida por carros a combustão interna, apesar de algumas montadoras norte americanas já ter ideia do funcionamento dessa peça, porém adiado o desenvolvimento por receio de aumentar muito o custo da produção dos carros, como retratado no filme *No Sudden Move*, que retrata a conspiração de 1953 a 1969 das quatro grandes montadoras dos EUA escondendo o desenvolvimento do catalisador²⁸.

No fim dos anos 80, as atenções se voltaram novamente aos carros elétricos, devido as políticas internacionais de combate a poluição atmosférica aliada da questão da busca de energia renovável. No começo dos anos 90, algumas políticas de incentivo ao desenvolvimento de carros elétricos para montadoras pelo governo americano abriram ainda mais portas das que já haviam vindo abertas ao longo das décadas anteriores¹².

Em 1997, a Toyota lançou o híbrido Prius, que não alcançou tanta expressão no mercado japonês, porém, no ano 2000 o Prius chegou ao mercado americano e obteve um sucesso de vendas muito além do estimado e ao longo dos anos 2000 mais e mais montadoras foram desenvolvendo e lançando carros híbridos cada vez com mais autonomia e mais tecnologias e aos poucos se tornando cada vez mais comuns e promissores¹².

Com o aumento da demanda energética e com o aumento da frota de mundial de veículos, com preços mais atrativos, os automóveis híbridos e elétricos parecem ser a opção mais viável para o futuro¹².

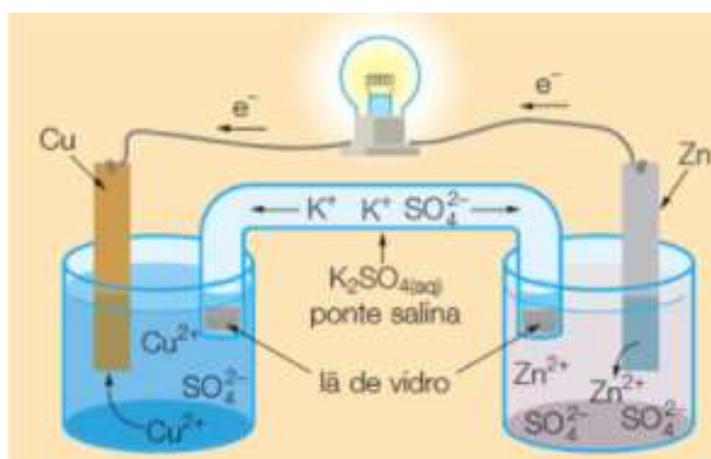
2.2 Baterias: Fundamento Teórico

Nos últimos anos, inúmeros formatos de pilhas e baterias apareceram no mercado, utilizadas para os mais diferentes propósitos imagináveis, desde para o simples funcionamento de um controle remoto até baterias tracionárias que são capazes de alimentar energeticamente

maquinários e veículos industriais que requerem enorme quantidade de energia. A história das baterias se inicia junto com a história das pilhas, apesar de parecerem coisas diferentes, na verdade baterias não são nada além de várias pilhas conectadas numa malha elétrica em paralelo, agregando o valor da diferença de potencial (*ddp*) de cada pilha para o sistema elétrico.³⁰

Então, o princípio de funcionamento de uma bateria é o mesmo princípio de funcionamento de uma pilha. Como pode ser visualizado na Figura 1.

Figura 1. Mecanismo eletroquímico de uma Pilha de Daniell.



Fonte: <https://querobolsa.com.br/enem/quimica/eletroquimica/>³³

Na Figura 1, pode-se observar a pilha de Daniell, que foi a primeira pilha após o invento da pilha voltaica por Alessandro Volta, que eliminou o problema da bolha de hidrogênio. Uma pilha é um dispositivo eletroquímico que contém dois eletrodos e um eletrólito, os eletrodos fazem a ponte do circuito elétrico com o eletrólito, que pode ser de diferentes estados físicos e não necessariamente tem de ser uma solução aquosa, mas deve sempre apresentar condutividade iônica.³⁰

Quando um equipamento elétrico é ligado aos eletrodos (no caso da pilha de Daniell as barras de cobre e de zinco) uma corrente elétrica flui pelo sistema elétrico devido a oxidação espontânea do zinco liberando elétrons livres. Como a barra de zinco sofre oxidação liberando os elétrons que abastecem o equipamento elétrico, a barra de cobre irá sofrer redução, e irá ficar

mais espessa por causa dos íons de cobre da solução de sulfato de cobre em que a mesma está contida, em contrapartida a barra de zinco será corroída e os íons de zinco irão para solução de sulfato de zinco.¹⁵

O eletrodo que sofre oxidação é denominado anodo e o que sofre redução, catodo, por convenção, quando um sistema eletroquímico é representado o elemento contido no anodo ficará a esquerda enquanto o constituinte do catodo ficara a direita, por exemplo, na bateria de chumbo/óxido de chumbo, o chumbo será o anion e o óxido de chumbo o catodo²⁹.

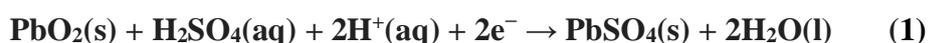
2.3 CLASSIFICAÇÃO DE BATERIAS

As baterias são classificadas de forma bem simples, em baterias primárias e secundárias. As baterias primárias são aquelas que não são recarregáveis pois as reações químicas que as constituem são irreversíveis e logo o ddp gerado pela bateria já não será o suficiente para sustentar o sistema elétrico. Já nas baterias secundárias, todas suas reações são reversíveis, permitindo assim sua recarga, para ser considerada uma bateria secundária, a bateria deve aguentar pelo menos 300 ciclos de carga e descarga e manter no mínimo 80% de sua capacidade. Agora abordaremos o funcionamento de baterias de íon lítio e de chumbo que são as principais constituintes das baterias automotivas²⁹.

2.3.1 Bateria de Chumbo-Ácido:

A bateria de chumbo-óxido de chumbo foi a primeira bateria recarregável a ser desenvolvida, e ainda é modelo para as baterias de chumbo atuais. O catodo é constituído de dióxido de chumbo e de ácido sulfúrico, o anodo é constituído de chumbo e ácido sulfúrico¹⁵.

No catodo o dióxido de chumbo reage com o ácido formando sulfato de chumbo e água, de acordo com a reação química 1: ¹⁵



Já no anodo o chumbo, reage com o sulfato da solução aquosa formando sulfato de chumbo, de acordo com a reação química 2: ¹⁵



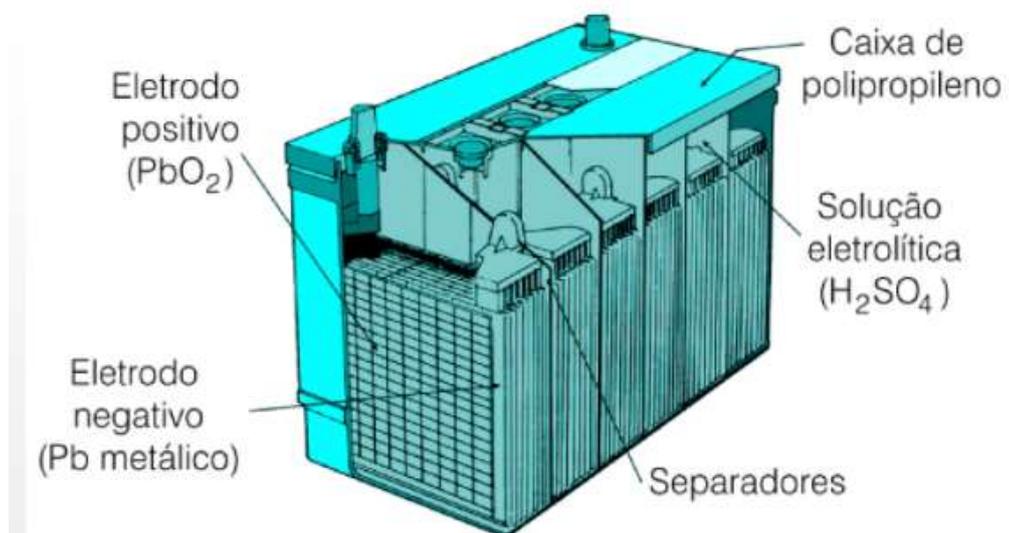
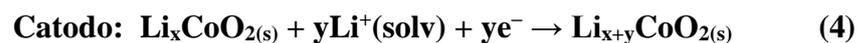
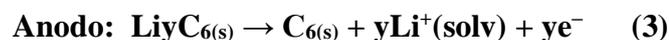
Conforme a reação progride o ácido é consumido dando lugar a água, o potencial do circuito aberto é dependente da concentração de ácido e da temperatura. No processo de carga ocorre a reação inversa em ambos os catodos, é formado chumbo no anodo e dióxido de chumbo no catodo. Na Figura 2, pode-se ver um esquema de uma bateria de chumbo-óxido.

Figura 2. Detalhes de uma bateria veicular.

Fonte: BOCCHI, FERRACIN, BIAGGIO, 2000.¹⁵

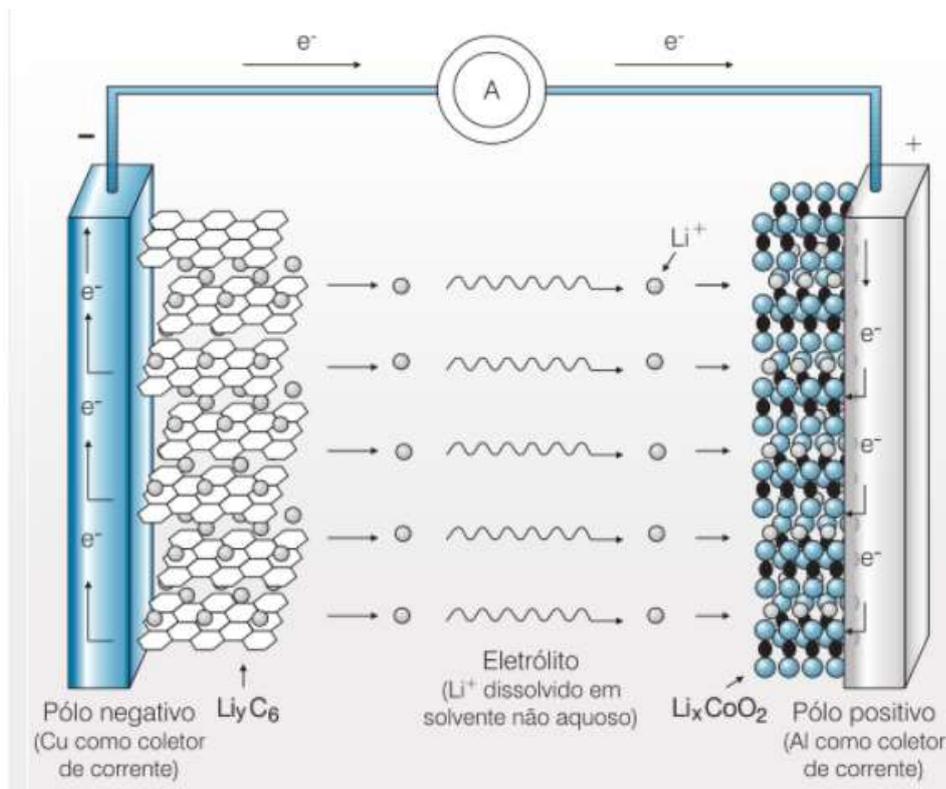
2.3.2 Bateria de íon lítio:

As baterias de lítio são constituídas de sais de lítio dissolvidos em solventes não aquosos no eletrólito. Quando a bateria é descarregada, os íons de lítio se deslocam do material constituinte do anodo, geralmente constituído de grafite que permite intercalar reversivelmente os íons de lítio entre suas camadas de carbono sem perda estrutural, para o catodo, que é constituído geralmente de óxido de estrutura lamelar. As reações no anodo e no catodo são descritas nas reações 3 e 4¹⁵.



O processo que ocorre em uma bateria de lítio pode ser visualizado na Figura 3.

Figura 3. Processo de funcionamento de uma pilha de lítio.

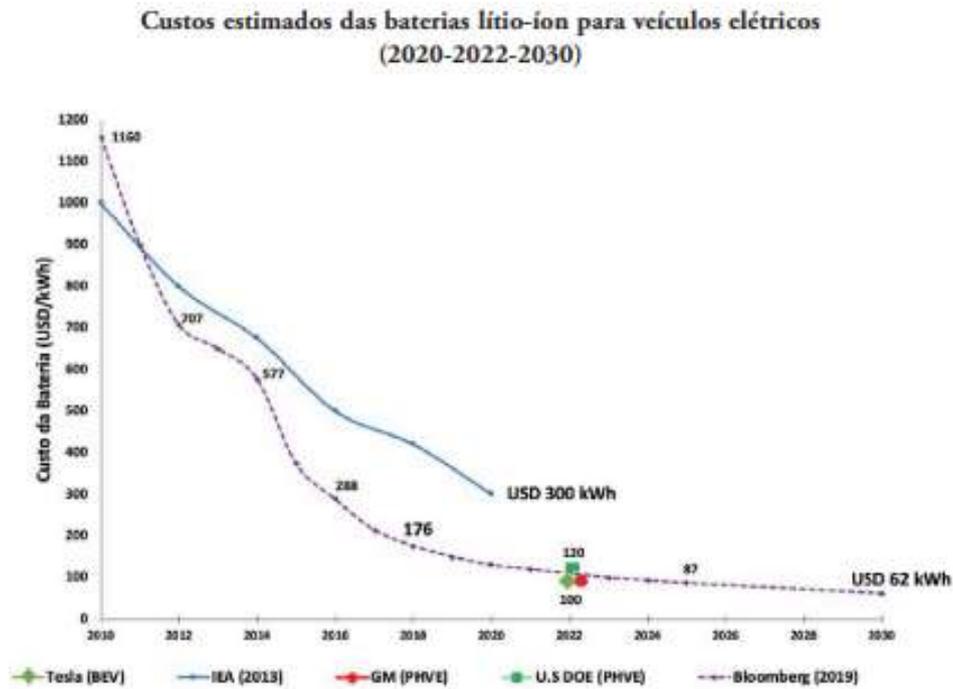


Fonte: BOCCHI, FERRACIN, BIAGGIO, 2000.¹⁵

Os elétrons migram pelo circuito externo, de acordo com a Figura 3. O desenvolvimento de baterias de íon lítio vem se aprimorando intensamente ao longo das últimas décadas, a meta principal é diminuir o custo do kilowatt-hora porém sem elevar a massa das baterias. Entre os principais motivos que levaram e continuam aprimorando as baterias de íon lítio, pode-se citar: melhoria química da bateria, principalmente do cátodo, para diminuir o custo com matéria prima, novos designs e melhoras nos processos de montagem.

A Figura 4, a seguir, nos mostra projeções dos custos da bateria por diferentes instituições²²:

Figura 4. Custos estimados das baterias de lítio (Li).

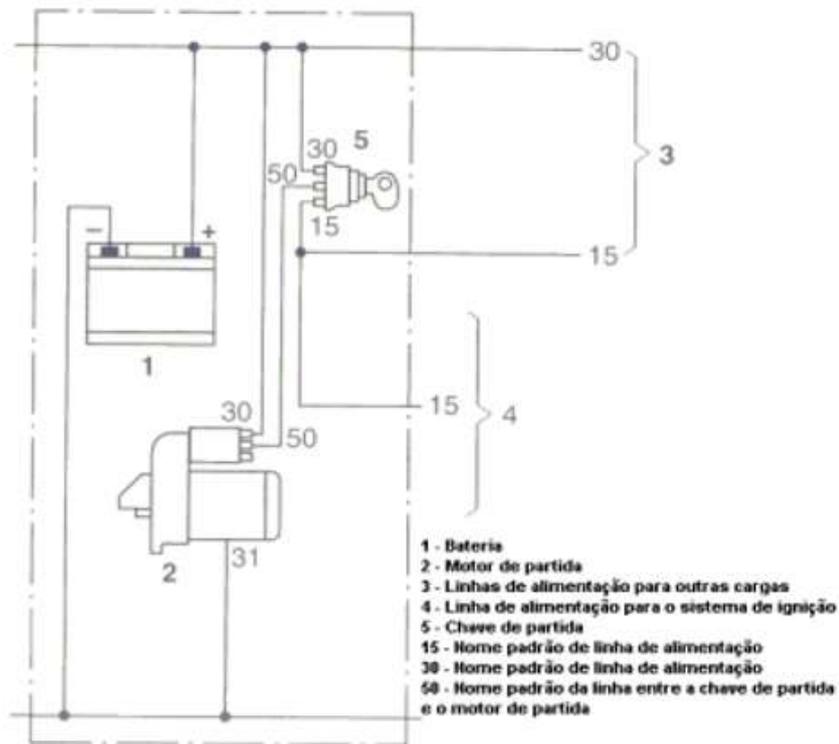


Fonte: BERMÚDEZ -RODRÍGUEZ, T.; CONSONI, F. L. Uma abordagem da dinâmica do desenvolvimento científico e tecnológico das baterias lítio-íon para veículos elétricos. **Revista Brasileira de Inovação**, Campinas, SP, v. 19, p. e0200014, 2020.²²

2.4 Como Funcionam as Baterias nos Carros

As baterias são utilizadas em automóveis principalmente para o sistema de ignição do motor a combustão e de forma secundária para alimentar sistemas elétricos, como vidros elétricos, iluminação, direção elétrica, injeção eletrônica, etc. Na Figura 5, pode-se visualizar o sistema de partida de um veículo automotivo¹⁶.

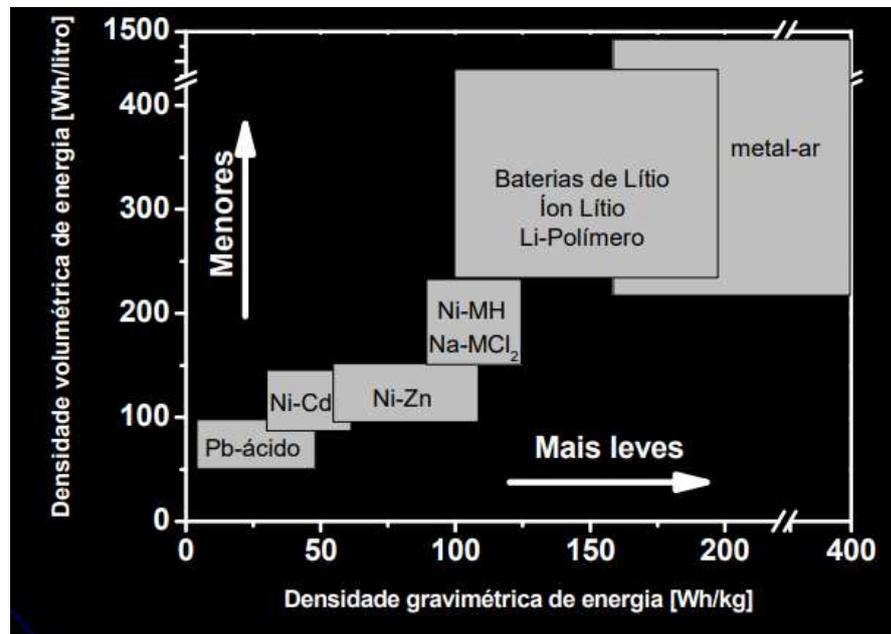
Figura 5. Sistema de partida de um veículo automotivo.



Fonte: OGAWA, 2011.¹⁶

Já nos carros elétricos, a bateria também é utilizada para alimentar o motor elétrico, e o sistema de tração do carro. Apesar da bateria de íon lítio ser a mais conhecida, são empregadas também outros tipos de baterias nos carros elétricos, a seguir vemos um gráfico de comparação entre os diferentes tipos de baterias, como mostra a Figura 6 a seguir.

Figura 6. Relação entre Densidade volumétrica e densidade gravimétrica entre vários tipos de baterias.



Fonte:

[https://www.fiepr.org.br/fomentoedesevolvimento/cadeiasprodutivas/uploadAddress/PatricioImpinnisiLACTEC \[31148\].pdf](https://www.fiepr.org.br/fomentoedesevolvimento/cadeiasprodutivas/uploadAddress/PatricioImpinnisiLACTEC [31148].pdf)³⁴

Conforme apresentado, pode-se notar que os fatores que influenciam a escolha de uma bateria para um veículo elétrico, é o volume, que tem que atender as necessidades de produção e limitações do chassi e do design geral dos componentes do carro, e a massa necessária para atingir um determinado valor energético, que influi diretamente na quantidade de potência que um motor terá de gerar para movimentar o veículo e na quantidade de energia necessária para tal tarefa³¹.

2.5 Descarte Incorreto e Reciclagem de Baterias

Os resíduos sólidos são classificados de acordo com a ABNT de acordo com seus impactos socioambientais e se dividem em dois tipos, os perigosos e os não perigosos¹⁷. As pilhas e baterias de quaisquer dispositivos eletrônicos estão contidas dentro da classificação perigosos, pois, como visto anteriormente, esses produtos contêm metais pesados em sua composição, como: chumbo, lítio, zinco, entre outros. Esses metais pesados são conhecidos pelo seu potencial tóxico, quando descartados de forma incorreta no meio ambiente, na sua degradação esse material pode atingir camadas mais profundas do solo, chegando a aquíferos e

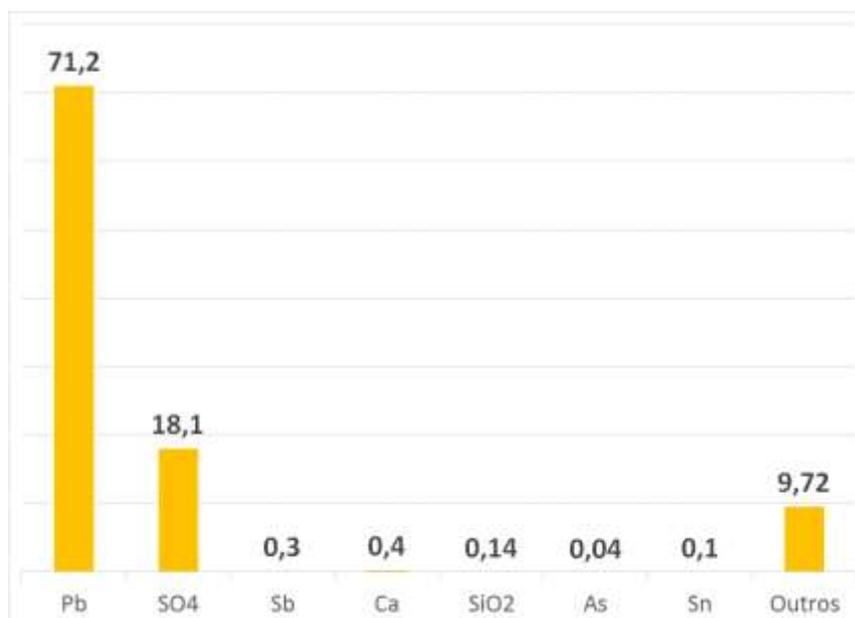
comprometendo a qualidade do mesmo, podendo causar malefícios a todo o bioma, desde vegetais até seres humanos¹⁸.

A Resolução do CONAMA nº401, em presente momento em vigor responsabiliza os fabricantes, importadores e comerciantes para junto com os consumidores organizar a coleta e descarte correto de suas pilhas e baterias, além de impor limites quantitativos para quantidade de chumbo, cádmio e mercúrio em pilhas e baterias comercializadas em território nacional¹⁹. Entretanto, afim de facilitar a gestão destes produtos, após longos anos de discussão, finalmente foi aprovada em 2010 a Lei nº 12.305/10 que da origem a Política Nacional de Resíduos Sólidos que aborda vários itens, e endossando a responsabilidade pós-consumo. Com isso, as empresas criam seus modelos de gestão de resíduos e os consumidores podem sofrer penalidades se falharem na colaboração desses modelos que são planejados e executados juntamente com as prefeituras, que atribuirão pontos de coletas para o descarte²⁰.

2.5.1 Bateria de chumbo:

No tópico anterior, pode-se verificar os componentes constituintes da bateria tipo chumbo-ácido, um metal pesado e um ácido altamente tóxico, elementos altamente danosos a vida e ao meio ambiente. No corpo humano o chumbo prejudica a produção da hemoglobina, além de distúrbios neurológicos e renais. O chumbo é pouco solúvel em água, e costuma formar compostos orgânicos estáveis, como o chumbo tetra metil e o chumbo tetra etil. Por ter a natureza hidrofóbica e apresentar elevada adsorção no solo, quando disposto na natureza, o chumbo fica retido nas camadas superiores da terra, comprometendo a qualidade dos nutrientes para os vegetais e acarretando riscos graves a saúde humana caso aconteça uma erosão²⁰. Na Figura 7 são vistas as principais substâncias presentes em uma bateria automotiva.

Figura 7. Porcentagem dos principais componentes de baterias automotivas.



Fonte: Reciclagem de Chumbo de Baterias Automotivas – CETEM²¹

Dentro deste quadro, podemos nota que existem outros componentes de menor quantidade que também podem ser reciclados além do chumbo. Na produção mundial de chumbo, a destinação para fabricação de baterias chega a valores maiores de 70% e as baterias são a maior fonte de matéria-prima secundária nas indústrias que utilizam chumbo, pois 90% do seu teor de chumbo é o chumbo metálico, enquanto os outros 10% se tratam de óxidos e outros compostos de chumbo²¹.

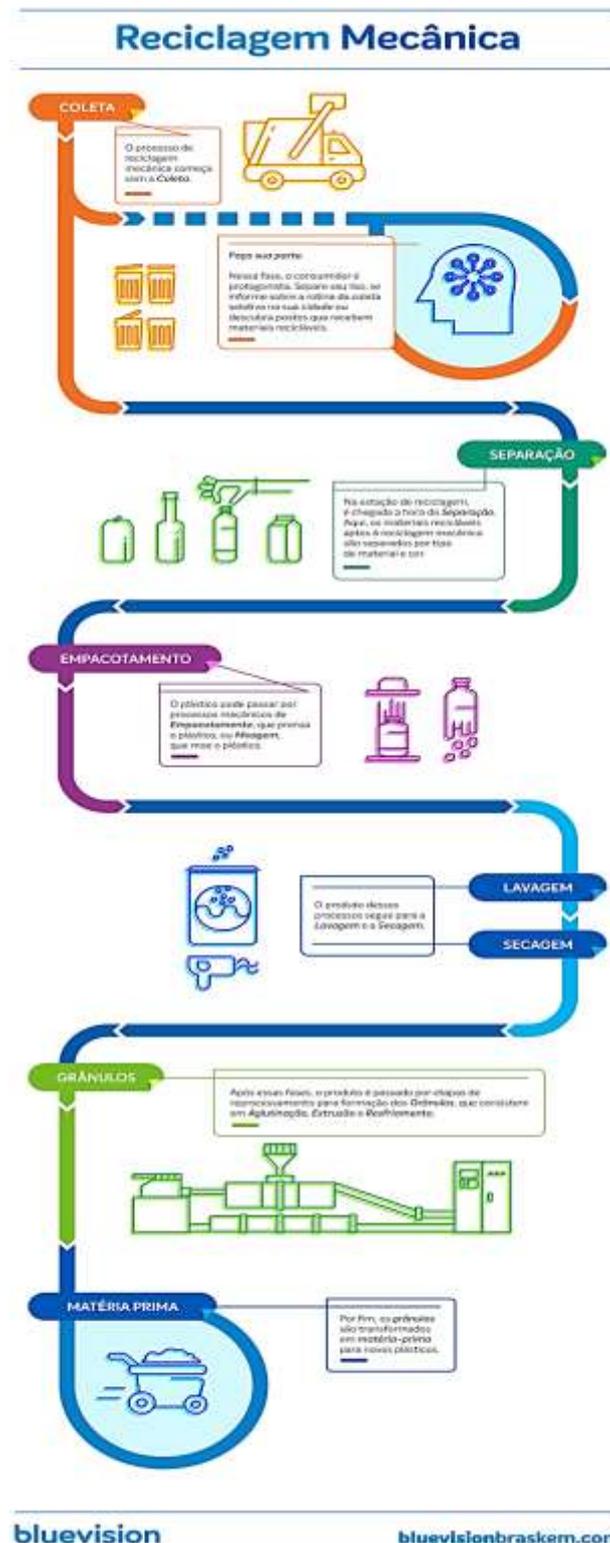
O método de reciclagem consiste em triturar a bateria, separar o polietileno, reciclar o material da caixa, o polipropileno e então iniciar o processo de reciclagem do chumbo. Para diminuir a quantidade de impurezas do chumbo, o mesmo é submetido a fornos em altas temperaturas, além do seu ponto de fusão e então é passado para um cadinho de refino se transformando em lingotes, para posterior comercialização. O atual processo de reciclagem do chumbo é realizado atualmente, em sua maioria, uma rota piro metalúrgica, que infelizmente libera na atmosfera óxidos de enxofre que também são extremamente prejudiciais ao meio ambiente, pois em contato com a umidade do ar da origem a chuva ácida. Neste processo, os outros metais são separados pelos seus pontos de fusão, com exceção do ferro que é separado magneticamente²¹.

Além dos metais, as baterias também contêm plástico nas suas estruturas, e apesar de aparentarem ser menos danosas ao ambiente, os polímeros também tem um papel muito relevante na questão ambiental. Os plásticos podem sofrer três tipos de reciclagem, e cada uma vai ser empregada de acordo com a natureza do plástico e qual será a destinação final, as variações são²¹:

- **RECICLAGEM MECÂNICA:** A reciclagem mecânica, como seu próprio nome diz, consiste em converter diretamente os rejeitos plásticos em grânulos que podem ser reutilizados na produção de outros produtos plásticos, como: sacos de lixo, mangueiras, embalagens não alimentícias, etc., sem alterar a natureza química do material reciclado.

A figura 8 nos apresenta um esquema simplificado de toda a cadeia de reciclagem mecânica:

Figura 8. Esquema da cadeia de reciclagem de polímeros.

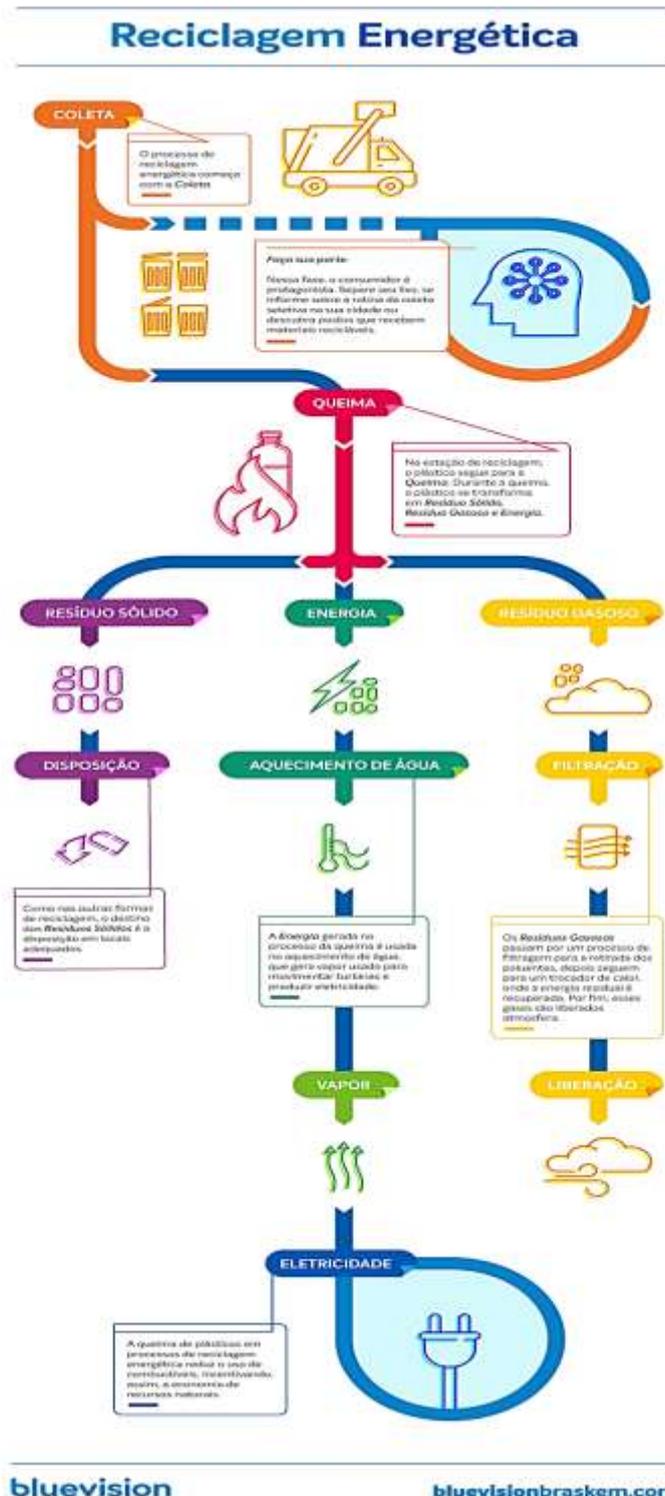


Fonte: <https://bluevisionbraskem.com/inteligencia/mecanica-energetica-ou-quimica-como-os-tipos-de-reciclagem-funcionam/>³⁵

- **RECICLAGEM ENERGÉTICA:** Esse tipo de reciclagem visa recuperar a energia contida nas ligações intermoleculares dos polímeros através de processos térmicos. O plástico servirá de combustível para a geração de energia elétrica.

A Figura 9 explica de como a energia contida nos polímeros pode ser aproveitada:

Figura 9. Esquema de geração de energia a partir da queima de polímeros.

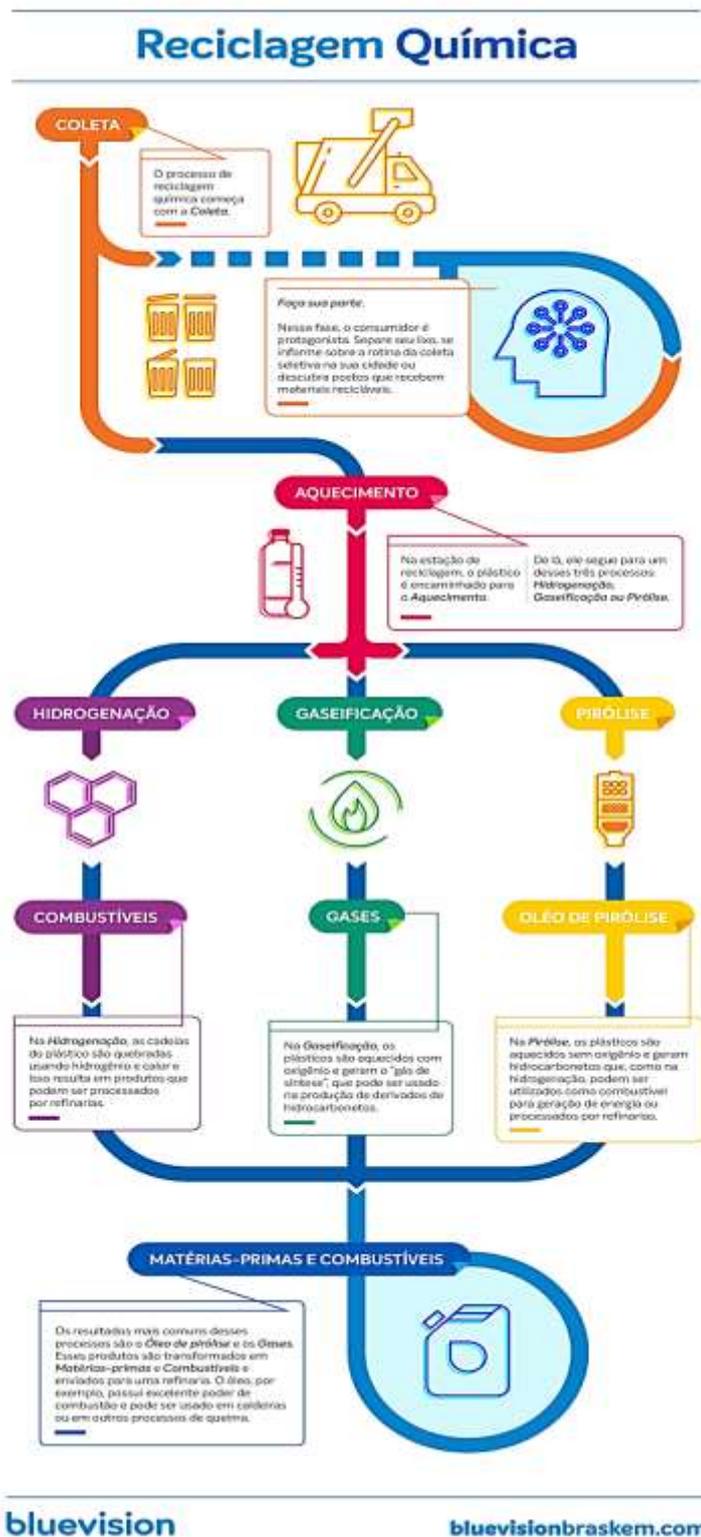


Fonte: <https://bluevisionbraskem.com/inteligencia/mecanica-energetica-ou-quimica-como-os-tipos-de-reciclagem-funcionam/>³⁵

- **RECICLAGEM QUÍMICA:** A reciclagem química busca transformar os polímeros nos reagentes que o deram origem, monômeros e misturas de hidrocarbonetos, que servirão de insumos para refinarias ou petroquímicas utilizarem em seus processos.

A Figura 10 apresenta quais processos químicos são utilizados no processo de reciclagem química dos plásticos:

Figura 10. Reciclagem através de processos químicos.



Fonte: <https://bluevisionbraskem.com/inteligencia/mecanica-energetica-ou-quimica-como-os-tipos-de-reciclagem-funcionam/>³⁵

2.5.1 Bateria de Lítio:

Existem vários tipos de baterias de íon lítio além da convencional, que é a mais utilizada, como²⁴:

- **Bateria de lítio-íon-cobalto (LCO):** Esse tipo de bateria contém grande quantidade de bateria específica, porém sua produção é mais restrita e de alto custo, pela pouca quantidade de cobalto no planeta;
- **Bateria de lítio-íon-manganês (LMO):** Essa bateria se caracteriza pela sua capacidade de ser segura em relação a explosões, porém, sua fabricação também é restrita por sua perda de carga é bem relevante na sua descarga;
- **Bateria de fosfato ferroso de lítio (LFP):** A bateria LFP foi desenvolvida com foco na durabilidade e proteção contra curto-circuitos, seu ponto negativo é que em baixas temperaturas a sua operação apresenta desempenho insatisfatório, e o número de ciclos diminuem;
- **Bateria de nanofosfato:** “Esta modalidade de bateria utiliza íons de sais de lítio dissolvidos em solvente não aquoso, no eletrólito. Quando ocorrem as descargas, os íons de lítio se deslocam para o interior do material que forma o ânodo e segue até o interior do material catódico, sendo que os elétrons se movem através da caixa externa”. A tecnologia empregada nessa bateria é relativamente nova e são escassos os estudos, porém sua densidade de lítio é baixa, garantindo um menor custo de produção, se provando ser promissora;
- **Bateria de lítio-íon óxido de titânio (LTO):** No caso desta bateria, os seus testes acabaram por resultar pouco promissores sua capacidade energética é de metade das baterias de íon lítio convencionais, seu ponto positivo é o tempo de recarga;
- **Bateria de lítio-polímero:** Essa bateria é considerada o futuro das baterias de lítio, nela o trânsito de elétrons acontece via um polímero sólido diluído em um solvente, essa bateria poderá alcançar os mais altos níveis energéticos pois utilizam-se de polímeros sólidos ao invés de eletrólitos inflamáveis.

Como o lítio é um elemento raro de se encontrar na natureza, a reciclagem desse componente é de muito interesse para indústria, pois traz um grande potencial econômico. Além do fator econômico, o lítio na natureza também causa danos ambientais, apesar de serem bem menos impactantes que metais pesados, pois o lítio não causa o processo de bioacumulação tão agressivo como o chumbo, por exemplo²³.

O processo de reciclagem do lítio das baterias depende de um sistema de coleta bem organizado. O processo de reciclagem é muito complexo, devido a natureza do lítio, as baterias descarregadas ainda apresentam energia residual, e existe risco de explosão devido a oxidação radical do lítio no processo e necessita de plantas industriais bem específicas para ser feita. As baterias são preparadas antes do processo de reciclagem, elas são descarregadas, essas descargas são feitas normalmente através do mergulho das baterias numa solução salina. Após a descarga, ocorre o processo mecânico de separação dos componentes, similar ao dos outros tipos de bateria²³.

O modo de separação dos componentes necessita de uma atenção extra, pois as células eletroquímicas possuem uma grande variedade de composições físicas e químicas. As baterias automotivas atualmente são desmanchadas a mão atualmente e necessitam de grande conhecimento técnico. Existem diferentes projetos de robótica que realizariam o processo de desmonte, o que acarretaria numa maior produtividade e menor risco para as pessoas que trabalham nesse posição²⁵.

Após a separação dos componentes, existem três métodos para reciclagem, e vamos discutir quais as características de cada um.

- **Recuperação piro metalúrgica:** Esse método é similar ao da bateria de chumbo, ele se utiliza da alta temperatura de um forno para fundir os metais presentes na bateria, os compostos orgânicos evaporam em uma temperatura mais baixa e os polímeros numa temperatura mais alta. O processo de piro metalurgia necessita, porém de outro processo para separar os metais do lingote obtido, o processo de hidrometalurgia²⁵.

- **Hidro metalurgia:** Esse processo é o mais utilizado na reciclagem da bateria de lítio, esse processo utiliza o princípio da dissolução do metal em meio aquoso. Nas baterias de lítio os materiais do cátodo podem ser lixiviados em alguns ácidos inorgânicos, como o ácido sulfúrico, ácido clorídrico e em alguns ácidos orgânicos. No caso do ácido clorídrico, temos a seguinte Equação 5²⁶:



Atualmente existem também tecnologias que se utilizam de bactérias que fazem o papel do solvente, esse método é chamado de bi lixiviação e é uma novidade²⁶.

- **Reciclagem direta:** Esse processo não envolve reações químicas complexas, após a descarga da energia residual, é injetado gás carbônico que extrai o eletrólito da bateria, posteriormente o gás carbônico pode ser separado do eletrólito após a diminuição da temperatura e da pressão. O restante da bateria é compactado e separado com técnicas físicas.

3 METODOLOGIA

O trabalho foi elaborado via método de revisão bibliográfica. A aplicação do método foi realizada no ambiente de home office, foram pesquisados artigos em revistas científicas, defesas de mestrado e de doutorado em portais científicos como: Google Acadêmico, CAPES, SCIELO, Biblioteca Digital de Teses e Dissertações e Scientific Research Publishing. Também foram pesquisados dados e estimativas em portais como o IBGE e Department Of Energy. A síntese e interpretação dos dados se tornou a base da pesquisa e o embasamento necessário para elaboração da mesma.

As palavras-chave utilizadas para localização dos artigos foram das mais variadas como: Bateria, Automotiva, Carro elétrico, Bateria de lítio, Bateria de chumbo, Reciclagem de Bateria, Descarte de Bateria, Veículo elétrico, Reutilização de Bateria Automotiva, e as palavras equivalentes na língua inglesa. Após a leitura de todo o artigo, foram pesquisadas também

algumas das referências utilizadas nestes artigos que pareciam ser promissoras para realização desta pesquisa. Após separação dos trechos mais importantes, e organização das ideias, os trechos foram reescritos de forma a facilitar a compreensão das principais ideias e finalmente foram inseridos figuras e gráficos, embasados nos dados coletados, para melhor assimilação dos mesmos.

4 DISCUSSÕES

A bateria automotiva sofreu várias atualizações e aprimoramentos com o passar dos anos, hoje em dia já está desempenhando um papel mais fundamental com os carros híbridos e elétricos. Seu fundamento é transformar energia química em energia elétrica, através de dois eletrodos e um eletrólito, e seu desempenho é constantemente aperfeiçoado através de descobertas de novos componentes e reações químicas que performam de melhor maneira, aumentando a durabilidade, segurança, valor mais acessível, etc.

Grande parte da eficácia de um processo de reciclagem, seja com baterias, mas também com outros materiais depende da coleta dos materiais. Atualmente existe uma conscientização maior na sociedade sobre a questão ambiental e isso facilita a separação e o descarte correto dos resíduos. Como visto, também já existem leis regulamentando a responsabilidade de cada um na cadeia de reciclagem e reuso, muitas cidades e indústrias vem implementando um sistema de logística reversa e de produção mais limpa para facilitar essa questão e se adequar as leis vigentes²⁷.

A bateria de chumbo é um projeto mais antigo e é empregado em larga escala por vários países, então sua logística de reuso e reciclagem já é bem estabelecida. Cerca de 65% a 67% do chumbo utilizado nas baterias advém de reciclagem²⁰ e seu principal método de reciclagem é o de piro metalurgia, as partes plásticas podem ser recuperadas e recicladas de três formas: mecânica, energética e química.

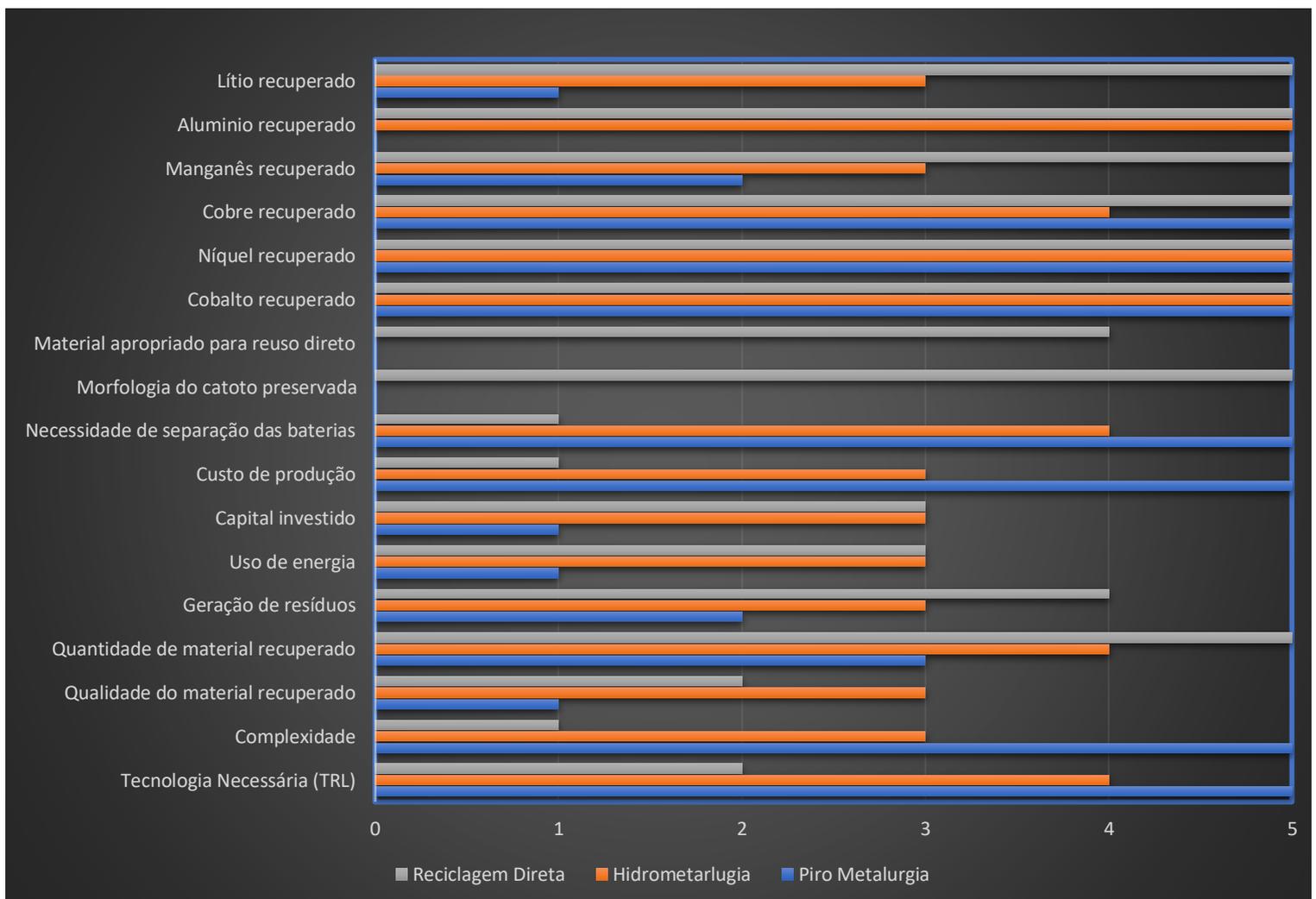
O caso das baterias de lítio é mais complexo, seu emprego é muito mais recente, a tecnologia evolui cada vez mais, e existem vários tipos de baterias com componentes das naturezas mais adversas. Porém, sua reciclagem tem um apelo econômico latente, pois o lítio é um metal de difícil obtenção e de custo elevado, diferente do chumbo, que seu apelo é mais

voltado a preservação do meio ambiente, pois é um metal pesado que acarreta em vários danos ambientais e sociais.

Na tabela a seguir vemos uma comparação entre os diferentes métodos de reciclagem de bateria de lítio, e quais são as vantagens e desvantagens de cada um:

Figura 11. Comparação dos diferentes métodos de reciclagem de baterias de lítio.

Fonte: Adaptado de HARPER, Gavin et al. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature*, v. 575, n. 7781, p. 75-86, 2019.²⁵



Valores maiores indicam facilidade no tópico, ou melhores resultados.

5 CONCLUSÃO

Nas últimas décadas o mundo passou por profundas transformações em relação aos bens de consumo, a natureza. Cada vez mais, as indústrias e os governos se preocupam com sustentabilidade e fontes de energia renováveis, e esse foi o estalo para volta do projeto de carros elétricos e híbridos.

As baterias sofreram profundas transformações ao longo dos séculos e hoje seu desenvolvimento é fundamental para inúmeros projetos que tem como pilar a sustentabilidade. Os carros a combustão se utilizam da bateria de chumbo-ácido para ignição, faróis e outras funcionalidades. O chumbo é altamente nocivo para a natureza e atualmente temos leis que regulamentam como deve ser feito o descarte e assim grande parte do chumbo e outros componentes da estrutura da bateria é recuperado via piro metalurgia.

Baterias de lítio são o coração dos carros elétricos, e auxiliam nos carros híbridos a serem mais econômicos e diminuem a emissão de gases poluentes. Existem muitos tipos de baterias de lítio e isso dificulta a sua reciclagem, pois têm de ser utilizados métodos mais rigorosos de separação. A recuperação do lítio é de grande interesse da indústria por se tratar de uma matéria prima de custo elevado. Atualmente são empregados três métodos de reciclagem para as baterias de lítio: Piro metalurgia, hidrometalurgia e reciclagem direta. Cada método tem nível de complexidade diferente e os componentes retirados variam de quantidade, e, caberá a indústria avaliar qual será mais vantajoso de acordo com seus interesses.

REFERÊNCIAS

1. GELMANOVA, Z. S. et al. Electric cars. Advantages and disadvantages. In: **Journal of Physics: Conference Series**. IOP Publishing, 2018. p. 052029.
2. CASTRO, B. H. R. D.; BARROS, Daniel Chiari; VEIGA, Suzana Gonzaga da. Baterias automotivas: panorama da indústria no Brasil, as novas tecnologias e como os

- veículos elétricos podem transformar o mercado global. **BNDES Setorial**, v. 37, p. 443-496, 2013.
3. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/22/28120/>>. Acesso em: 30 de ago. de 2021
 4. Disponível em: <<https://www.austrade.gov.au/ArticleDocuments/5572/Lithium-Ion%20Battery%20Value%20Chain%20report.pdf.aspx>>. Acesso em: 30 de ago. de 2021
 5. Disponível em: <<https://www.economist.com/graphic-detail/2021/03/31/lithium-battery-costs-have-fallen-by-98-in-three-decades>>. Acesso em: 30 de ago. de 2021
 6. BELGAMASCO, Maria Eduarda Fagan; SILVA, Tamyris Tavares da; ANGELIS NETO, Generoso de. Logística reversa de baterias automotivas: um estudo de caso em uma distribuidora de autopeças. 2017.
 7. Disponível em: <<https://www.tesla.com/blog/bit-about-batteries/>>. Acesso em: 30 de ago. de 2021
 8. HEELAN, Joseph et al. Current and prospective Li-ion battery recycling and recovery processes. **Jom**, v. 68, n. 10, p. 2632-2638, 2016.
 9. HOYER, K.G. (2008) The History of Alternative Fuels in Transportation: The Case of Electric and Hybrid Cars. *Utilities Policy*, 16, 63-71.
 10. WESTBROOK, M.H., 2001. The Electric Car: Development and Future of Battery, Hybrid and Fuel-Cell Cars. Society of Automotive Engineers Inc., Warrendale, PA, USA.
 11. WAKEFIELD, E.H., 1994. History of the Electric Automobile: Battery-Only Powered Cars. Society of Automotive Engineers Inc., Warrendale, PA, USA

12. Baran, R. and Luiz Fernando Loureiro Legey. “Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil.” (2011).
13. CHAVES, Maria do Perpétuo Socorro Rodrigues; RODRIGUES, Débora Cristina Bandeira. Desenvolvimento sustentável: limites e perspectivas no debate contemporâneo. **Interações (Campo Grande)**, v. 8, p. 99-106, 2006.
14. IGNACY, Sachs. Desenvolvimento sustentável, bioindustrialização descentralizada e novas configurações rural-urbanas: os casos da Índia e do Brasil. In: VIEIRA, Paulo Freire; WEBER, Jacques (Orgs.). *Gestão de Recursos Naturais Renováveis e Desenvolvimento – novos desafios para a pesquisa ambiental*. 3.ed. São Paulo: Cortez, 2002.
15. BOCCHI, Nerilso; FERRACIN, Luiz Carlos; BIAGGIO, Sonia Regina. Pilhas e baterias: funcionamento e impacto ambiental. **Química Nova na escola**, v. 11, n. 3, 2000.
16. OGAWA, Vanessa Gomes Cruz. **Proposta de identificação dos parâmetros do modelo de bateria para uso na modelagem de sistemas de partida de veículos automotivos**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
17. ABNT. **NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004.
18. SANTOS, Edenilde Alves dos et al. Diagnóstico situacional do descarte de pilhas, baterias de celulares e automotivas em São Luís-MA. 2013.
19. Disponível em: <<http://conama.mma.gov.br/images/conteudo/LivroConama.pdf>>. Acesso em: 22 de out. de 2021
20. FERNANDES, Josely Dantas et al. Estudo de impactos ambientais em solos: o caso da reciclagem de baterias automotivas usadas, tipo chumbo-ácido. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v. 7, n. 1, 2011.

21. MEDINA, H. V.; GOMES, D. E. B. Reciclagem de automóveis: estratégias, práticas e perspectivas. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2003. (Série Tecnologia Ambiental, 27).
22. BERMÚDEZ -RODRÍGUEZ, T.; CONSONI, F. L. Uma abordagem da dinâmica do desenvolvimento científico e tecnológico das baterias lítio-íon para veículos elétricos. **Revista Brasileira de Inovação**, Campinas, SP, v. 19, p. e0200014, 2020.
23. Zeng, Xianlai, Jinhui Li, and Narendra Singh. Recycling of spent lithium-ion battery: a critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 44, no. 10 (2014): 1129-1165.
24. GUIMARÃES, Gláucia Katiúscia Ferreira. Inserção de carros elétricos no Brasil: avaliação da demanda e reservas de lítio. 2017.
25. HARPER, Gavin et al. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. **Nature**, v. 575, n. 7781, p. 75-86, 2019.
26. HUANG, Bin et al. Recycling of lithium-ion batteries: Recent advances and perspectives. **Journal of Power Sources**, v. 399, p. 274-286, 2018.
27. SHIBAO, Fábio Ytoshi; MOORI, Roberto Giro; SANTOS, MR dos. A logística reversa e a sustentabilidade empresarial. **Seminários em administração**, v. 13, 2010.
28. Disponível em: <<https://www.latimes.com/entertainment-arts/movies/story/2021-07-02/no-sudden-move-spoilers-ending-explained-hbo-max>>. Acesso em: 25 de out. de 2021
29. CHAGAS, Marcos Wilson Pereira. Novas tecnologias para avaliação de baterias. **Mestrado Profissionalizante, IEP/LACTEC**, 2007.
30. WOLFF, Eliane; CONCEIÇÃO, Samuel Vieira. Resíduos sólidos: a reciclagem de pilhas e baterias no Brasil. **Anais... XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção-ENEGEP. Belo Horizonte**, 2011.

31. MARTINS, Jorge; BRITO, F. P. Carros elétricos. 2011.
32. SOUZA, K. G. M.; TRINDADE, R. E. Investigação de rotas hidrometalúrgicas para a reciclagem de chumbo de baterias automotivas. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 6. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 1999.
33. Disponível em: <<https://querobolsa.com.br/enem/quimica/eletroquimica/>>. Acesso em: 25 de out. de 2021
34. Disponível em
:<[https://www.fiepr.org.br/fomentoedesarvolvimento/cadeiasprodutivas/uploadAddresses/PatricaoImpinnisiLACTEC \[31148\].pdf](https://www.fiepr.org.br/fomentoedesarvolvimento/cadeiasprodutivas/uploadAddresses/PatricaoImpinnisiLACTEC%20%5B31148%5D.pdf)>. Acesso em: 25 de out. de 2021
35. Disponível em: < <https://bluevisionbraskem.com/inteligencia/mecanica-energetica-ou-quimica-como-os-tipos-de-reciclagem-funcionam/>>. Acesso em: 25 de out. de 2021