

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GABRIELI DICKEL

**COMPARAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL DAS BATERIAS DE LÍTIO E DAS
BATERIAS DE SÓDIO UTILIZADAS EM VEÍCULOS ELÉTRICOS**

CURITIBA

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GABRIELI DICKEL

**COMPARAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL DAS BATERIAS DE LÍTIO E DAS
BATERIAS DE SÓDIO UTILIZADAS EM VEÍCULOS ELÉTRICOS**

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada em Ciências Agrárias (PECCA), no setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de MBA em Projetos Sustentáveis e Inovações Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Mariano Macedo.

CURITIBA

2024

RESUMO

Os veículos elétricos operam exclusivamente com baterias, sem demandar a utilização de combustíveis fósseis, ajudando a reduzir a emissão de gases de efeito estufa. Devido ao impacto ambiental de carros no mundo, empresas de carros elétricos investem em tecnologias para aumentar a vida útil das baterias, além de buscar soluções para uma utilização secundária. O trabalho compara características dos componentes químicos utilizados na fabricação de baterias de lítio e baterias de sódio para veículos elétricos. A comparação técnica se baseou em indicadores ambientais, como consumo de recursos naturais extraídos por mineração e eficácia dos sistemas de reciclagem das baterias de veículos elétricos (VES). Os quesitos analisados foram: extração de matérias-primas, durabilidade e ciclo de vida, logística reversa e reciclagem e métodos de descarte. A extração do lítio tem um impacto ambiental maior em relação à extração do sódio, devido ao intenso processo de mineração. O sódio é um material abundante encontrado em salinas ou rochas, sendo a sua extração menos disruptiva, sem demandar maior uso de água em relação à extração do lítio e seus impactos em habitats naturais são menores. A vida útil de uma bateria de íons de lítio equivale à vida útil do veículo elétrico e possui uma capacidade energética de 30% por volume físico em relação à de sódio. A longo prazo, as baterias de lítio não são sustentáveis, devido à limitação de suas reservas. O sódio é abundante e economicamente viável numa escala alta comparado ao lítio. A reciclagem de baterias de lítio é complexa e cada componente deve ser segregado durante o processo, para que apenas os que não possam ser reciclados, sejam destinados adequadamente para aterros sanitários. No Brasil, tem-se a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) que responsabiliza os fabricantes pelo ciclo de vida dos produtos. O descarte final, deve seguir as premissas da Resolução CONAMA nº 402/2008.

Palavras-chave: bateria; impacto ambiental; veículos elétricos.

ABSTRACT

Electric vehicles operate exclusively on batteries, reducing the need for fossil fuel consumption and helping to mitigate greenhouse gas emissions. Due to the environmental impact of cars worldwide, electric vehicle companies are investing in technologies to extend battery lifespan and find secondary usage solutions. This paper compares the chemical components used in the manufacturing of lithium and sodium batteries for electric vehicles. The technical comparison is based on environmental indicators, such as natural resource consumption through mining and the effectiveness of recycling systems for electric vehicle batteries (EVBs). The aspects analyzed include raw material extraction, durability and life cycle, reverse logistics and recycling, and disposal methods. Lithium extraction has a greater environmental impact compared to sodium extraction due to the intensive mining process. Sodium, a material abundant in salt flats or rocks, is less disruptive to the environment, requiring less water and having a lower impact on natural habitats. The lifespan of a lithium-ion battery matches that of an electric vehicle, with an energy capacity of 30% by physical volume compared to sodium. In the long term, lithium batteries are not sustainable due to the limited availability of reserves. Sodium is abundant and economically viable on a large scale compared to lithium. Recycling lithium batteries is complex, requiring the segregation of each component, with only those that cannot be recycled being sent to landfills. In Brazil, the National Solid Waste Policy (Law No. 12.305/2010) holds manufacturers responsible for the product lifecycle, and disposal must follow the guidelines of CONAMA Resolution No. 402/2008.

Keywords: battery, environmental impact, electric vehicles.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
2. OBJETIVOS.....	8
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
3.1 VEÍCULOS ELÉTRICOS.....	9
3.2 BATERIAS PARA CARROS ELÉTRICOS	9
3.3 LOGÍSTICA REVERSA	10
4. MATERIAL E MÉTODOS	12
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
5.1 IMPACTO AMBIENTAL NA EXTRAÇÃO DO LÍTIO E DO SÓDIO.....	13
5.2 TEMPO DE VIDA ÚTIL DA BATERIA DE LÍTIO E DA BATERIA DE SÓDIO .	15
5.3 LOGÍSTICA REVERSA	17
5.4 DESCARTE FINAL.....	19
6. CONCLUSÃO	21
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	22

1. INTRODUÇÃO

Em vários centros urbanos do Brasil já é possível notar a disponibilidade de vagas para carros elétricos com dispositivos de recarga de baterias, sejam em garagens residenciais, centros comerciais e shoppings (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2023).

Os veículos elétricos funcionam integralmente a base de bateria, sem a demanda de utilização de combustível fóssil, sendo uma grande expectativa para diminuição de emissão de gases de efeito estufa (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2023).

Mesmo sendo boas alternativas, as baterias ainda preocupam quanto à sustentabilidade dos automóveis elétricos, tendo em vista o seu descarte após o tempo de vida útil, a fonte de energia (quando não renovável) usada para recarregar esses produtos e o impacto local pela extração do lítio (SIEMENS, 2024).

Além do lítio, o sódio vem sendo pensado como uma matéria-prima para fabricação de baterias também. É um elemento químico abundante na natureza, presente no mar e em reservas salinas em todos os continentes. A mesma substância pode constituir uma alternativa importante no processo de armazenamento de energia, podendo substituir o lítio em 25% das baterias hoje utilizadas em carros elétricos, smartphones, notebooks, dentre outros aparelhos eletrônicos (ZAPAROLLI, 2023).

Para diminuir os impactos ambientais provocados pelos mais de 1,4 bilhão de carros registrados no mundo todo, empresas de carros elétricos progredem na tecnologia desses automóveis, procurando elevar o tempo de vida útil das baterias e em como poderiam ser utilizadas após o descarte (JORNAL DA USP, 2022).

Em relação ao destino final, países com maior quantidade de carros elétricos circulando estão determinando que as principais montadoras realizem a reciclagem das baterias usadas com tecnologias já existentes (JORNAL DA USP, 2022).

Portanto, este estudo teve como objetivo comparar baterias de lítio e baterias de sódio empregadas em veículos elétricos. O tema foi escolhido tendo em vista sua relevância para a sustentabilidade, meio ambiente, bem como a logística

reversa, que são pontos essenciais para a gestão eficiente das baterias durante seu tempo de vida útil.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi comparar as características dos componentes químicos utilizados na fabricação de baterias de lítio e de baterias de sódio em veículos elétricos, com análise centrada nos seguintes quesitos:

- Impacto ambiental na extração das matérias-primas:
 - Efeitos ambientais associados à mineração e extração dos metais utilizados em cada tipo de bateria; e
 - Degradação do solo, poluição hídrica e gases de efeito estufa.
- Tempo de vida útil de uma bateria:
 - Análise da durabilidade e do desempenho das baterias ao longo do tempo, comparando a vida útil média e a degradação de capacidade entre baterias de lítio e de sódio.
- Logística reversa desses produtos e descarte:
 - Avaliação da eficiência e dos desafios da logística reversa para a reciclagem e reutilização das baterias;
 - Métodos de descarte final das baterias e seus impactos ambientais, com ênfase na gestão de resíduos e na segurança do meio ambiente.

Dessa forma, este estudo objetivou fornecer uma visão sobre os benefícios e os desafios associados aos componentes lítio e sódio que são utilizados em baterias de carros elétricos, auxiliando numa escolha mais informada e sustentável para a adoção de tecnologias para essa classe de veículos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 VEÍCULOS ELÉTRICOS

Os veículos elétricos são meios de transporte que utilizam um ou mais motores elétricos, parcial ou completamente, para propulsão. Estes automóveis são movidos à base de eletricidade que pode ser obtida pela conexão direta à fonte externa de eletricidade, através de *plugs* ou cabos aéreos, sistema de indução eletromagnética ou por energia mecânica de frenagem (frenagem regenerativa, ao frear o veículo). Logo após, a eletricidade gerada é armazenada em baterias químicas que fazem a alimentação de motor elétrico (FGV ENERGIA, 2017), que opera a partir da conversão de energia elétrica em energia mecânica, a qual é utilizada para tracionar e gerar movimento (AZEVEDO, 2018).

Os automóveis elétricos têm sido uma alternativa para se locomover de maneira sustentável em relação aos veículos que operam por combustão (SIEMENS, 2024), pois fazem parte do grupo dos veículos de “emissões zero”, tendo em vista que quase não emitem poluentes atmosféricos e sonoros e não utilizam combustíveis fósseis para operar, especialmente petróleo (FGV ENERGIA, 2017).

De acordo com a Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE, 2024), o Brasil chegou a ter cerca de 80 mil veículos elétricos vendidos no primeiro semestre de 2024, possuindo 300 mil veículos em circulação. Esse resultado representa um aumento de 146% em relação ao mesmo período do ano de 2023.

Os números registrados acima marcam um momento de crescente da eletromobilidade no Brasil, confirmando que a previsão da ABVE que o ano de 2024 terminará com um recorde de vendas de mais de 150 mil veículos elétricos, significando um crescimento acima de 60% sobre os mais 90 mil carros vendidos em 2023 (ABVE,2024)

3.2 BATERIAS PARA CARROS ELÉTRICOS

A bateria é um acumulador que transforma energia química em energia elétrica e vice-versa, comumente através de uma reação de oxirredução. O polo

negativo é o anodo, onde acontece a oxidação, e o polo positivo é o catodo, onde ocorre a redução. Os elétrons percorrem do anodo até o catodo gerando energia elétrica (CASTRO; BARROS; VEIGA, 2013).

As baterias começaram a ser utilizadas em 1912, de maneira a substituir a manivela de ignição e acionar as luzes dos carros. Agora, operam como fonte de energia para sistemas auxiliares que aumentaram quantitativamente para demandas pontuais, como o sistema de ignição (CASTRO; BARROS; VEIGA, 2013).

Nos carros elétricos, a bateria é o principal lugar de deposição da energia necessária para tracionar as rodas. Além disso, esses veículos dispõem de uma bateria auxiliadora de segurança que leva energia aos acessórios internos, bem como todos os outros automóveis (NEOCHARGE, 2024).

Esse produto que promove locomoção pode ser produzido com minerais que vão armazenar a eletricidade usada pelo motor do veículo. Por exemplo, podemos ter como matéria-prima: lítio, cobalto, níquel, manganês, grafite, alumínio, cobre, aço e ferro, terras raras, nióbio, dentre outros, quando combinados entre si, podem compor baterias (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2023).

Com o uso dos minerais nas baterias, os automóveis elétricos podem chegar ao peso de 300 quilos. Porém, esse fator será compensado com os demais itens e acessórios que não serão necessários em um automóvel puramente elétrico (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2023).

3.3 LOGÍSTICA REVERSA

Apesar de ser uma das soluções para diminuir a emissão de gases de efeito estufa, ainda não se fala muito sobre o processo de logística reversa das baterias utilizadas em veículos elétricos.

Conforme a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) descrita na Lei Federal nº 12.305/2010, art. 3º, parágrafo XII, a logística reversa é:

Instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada.

De acordo com o professor Fernando de Lima Caneppele, entrevistado pelo Jornal da USP (2022), as baterias possuem vários componentes que são facilmente reciclados como o plástico e o alumínio. Entretanto, metais raros como cobre, cobalto e neodímio, além de produtos químicos utilizados, precisam ter o processo de reciclagem aperfeiçoado.

Ainda segundo o professor Caneppele, um caminho seria reutilizar as baterias em fim de vida útil em outros processos como, por exemplo, acumuladores de carga nas próprias fábricas, prolongando o seu tempo de uso.

Como exemplo, a fabricante automotiva Porsche utilizou 4.400 módulos reciclados de baterias de carros elétricos do modelo Taycan para criar um sistema de armazenamento de energia em grande escala na fábrica de Leipzig, Alemanha (CICLO VIVO, 2024).

A General Motors (GM) conseguiu alcançar a reciclabilidade em cerca de 95% das matérias-primas das baterias dos seus carros elétricos. Este reaproveitamento, diminuiu em 75% as emissões e em 90% o uso de água, em comparação à extração dos componentes pela mineração (MEDIA GM, 2023).

4. MATERIAL E MÉTODOS

Para realizar a comparação técnica entre as baterias compostas de lítio e de sódio, foi utilizada uma abordagem sistemática que inclui a revisão de literatura, análise de dados de estudos de caso, artigos, periódicos, trabalhos científicos, revistas online e jornais.

A comparação foi realizada com base em indicadores ambientais, como consumo de recursos naturais extraídos por mineração e eficácia dos sistemas de reciclagem das baterias de veículos elétricos.

A justificativa para essa abordagem provém da necessidade de garantir dados precisos e recentes sobre os impactos ambientais das baterias de lítio e de sódio fabricadas para utilização em carros elétricos.

Essa metodologia permitiu uma análise para os seguintes quesitos:

1. Extração de matérias-primas: avaliação dos efeitos ambientais na etapa inicial do ciclo de vida das baterias;
2. Durabilidade e ciclo de vida: avaliação do desempenho e longevidade das baterias de lítio e de sódio com comparação técnica do tempo de vida útil e eficiência energética;
3. Logística reversa e reciclagem: avaliação das técnicas e desafios na gestão de resíduos das baterias de veículos elétricos; e
4. Métodos de descarte: avaliação dos métodos e regulamentações de descarte final para compreender os impactos associados ao fim da vida útil das baterias e as soluções disponíveis para minimizar os danos ambientais.

Portanto, a escolha desta metodologia assegurou a análise baseada em dados recentes e confiáveis, proporcionando uma base sólida para a discussão dos impactos ambientais das baterias de lítio e de sódio e para a formulação de recomendações fundamentadas para a adoção sustentável dessas tecnologias.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 IMPACTO AMBIENTAL NA EXTRAÇÃO DO LÍTIO E DO SÓDIO

O lítio (Li) é o metal mais leve, com número atômico 3 e massa atômica de 6,939 g/mol (ALECRIM, 1982). Esse material ocorre principalmente em salmouras evaporíticas e em rochas duras, conhecidas como pegmatitos (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2023). Além disso, o metal possui alta reatividade e alta inflamabilidade (EPE, 2019).

Na América Latina, as maiores reservas de lítio estão na Argentina e no Chile, porém, as minas do Brasil são mais vantajosas (JORNAL DA USP, 2024). A Argentina e o Chile concentram 46% das reservas de lítio no mundo, com exploração economicamente viável. Somando à Bolívia, os recursos aumentam para 56% (AIDA, 2024).

A extração do lítio inicia com a perfuração da salina, então, a salmoura é bombeada para grandes piscinas. Após isso, a água deve evaporar para que a concentração de lítio se eleve e, então, a salmoura é canalizada para a indústria. A mesma, passa por um processo químico para obter carbonato de lítio, o qual é comercializado para a fabricação de baterias (AIDA, 2024).

Um dos primeiros impactos é o socioambiental com a alteração da paisagem, visto que a principal maneira de extração mineral é realizada a céu aberto, como no Brasil, especificamente no Vale do Jequitinhonha. Para isso, é necessário realizar um desmatamento volumoso na região de interesse, além da retirada de todo o solo fértil presente (CÁRITAS BRASILEIRA, 2024).

A poluição atmosférica causada por lama e poeira, é uma consequência severa também, sendo mais percebida quando as barragens são edificadas próximas às comunidades locais (CÁRITAS BRASILEIRA, 2024).

Ainda segundo o autor, o consumo de água para lavagem e transporte do minério é elevado e a extração provoca o rebaixamento do lençol freático, comprometendo então, a recarga de aquíferos. Além disso, pode ocorrer a contaminação de nascentes, rios e mares.

O lítio é normalmente encontrado em regiões com pouca disponibilidade de água. Sendo assim, o gasto com esse recurso aumenta durante o processo de

mineração (CÁRITAS BRASILEIRA, 2024). Segundo AIDA (2024), a extração leva à perda de água durante o bombeamento da salmoura, pois a evaporação nas piscinas necessita de 2 milhões de litros de água para cada tonelada de lítio produzida. De acordo com Reuter (2023), pode haver problemas na água potável, devido ao bombeamento da salmoura que potencializa a diminuição dos níveis de águas subterrâneas. Paralelamente, leitos de rios e zonas úmidas podem secar.

No processo de extração por evaporação, a água utilizada é da salmoura e a extração excessiva pode gerar mudanças climáticas locais e modificar a taxa de evaporação natural (LEWKOWICZ, 2022).

O sódio (Na) possui número atômico 11 na tabela periódica e uma massa atômica de 22,990 g/mol (ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY, 2024). O Na é um dos elementos mais comuns na Terra e ocorre em vários minerais. A água do mar possui quantidade significativa de sódio, sendo que em cada 1 litro contém 11 g de íons de sódio (INSTITUTE FÜR SELTENE ERDEN UND METALLE AG, 2024).

Ainda conforme o autor, o Na é obtido principalmente pelo cloreto de sódio que é obtido normalmente por mineração ou secagem de soluções salinas.

A extração do sal marinho é uma atividade exercida há meio século no litoral do Rio Grande do Norte, por exemplo, sendo um setor produtivo relevante na geração de empregos. Embora seja importante na socioeconomia, a extração do sal necessita ocupar áreas nas margens de estuários e baías, levando à degradação dos ecossistemas costeiros como manguezais e Apicuns (IFMA, 2020).

De acordo com a Chine Southern Power Grid Energy Storage (PV MAGAZINE GLOBAL, 2024), comparado às baterias de íons de lítio, as reservas de sódio são abundantes, fáceis de extrair, de baixo custo, possuem melhor desempenho em temperaturas menores e armazenam energia em larga escala. Com as baterias de sódio, o custo do armazenamento diminui de 20% a 30%.

Conforme as informações apresentadas acima, entende-se que a extração do lítio tem um pacto ambiental maior em relação à extração do sódio, principalmente devido ao processo intensivo de mineração e ao uso de grandes quantidades de água em áreas já áridas. Além disso, pode levar à degradação de ecossistemas locais, poluição da água e emissões de gases de efeito estufa.

O sódio, por outro lado, é abundante e a sua extração é realizada a partir de fontes salinas ou rochas, tendendo a causar menos danos ambientais, tendo em

vista que o processo é menos disruptivo e não exige tanto uso de água, ou então, destruição de habitats sensíveis. Além disso, o sódio é mais facilmente reciclado e possui aplicações mais diversificadas, com menos pressões ambientais associadas à sua produção.

5.2 TEMPO DE VIDA ÚTIL DA BATERIA DE LÍTIO E DA BATERIA DE SÓDIO

O rendimento de uma bateria varia conforme seu tamanho, tecnologia, massa do veículo, fabricante, dentre outros. Tendo em vista que veículos elétricos ainda são um assunto recente, não há dados conclusivos sobre a vida útil total das suas baterias.

De acordo com a Geotab (2023), os fatores comuns que afetam a integridade das baterias com íons de lítio são: horário; altas temperaturas; operações em estado de carga alto e baixo; corrente elétrica alta; e isso (ciclos de energia). Além disso, podem influenciar: o uso, climas extremos e tipo de carregamento.

As baterias de íons de lítio após alcançar 80% da sua capacidade nominal, não são apropriadas para uso em veículos elétricos (VES). Todavia, podem ser úteis em usos secundários, tais como: bateria de emergência, gerenciamento de cargas, armazenamento doméstico de energia, uso móvel (maquinários). Conforme o uso secundário, a vida útil de uma bateria poderá atingir até 20 anos (NATKUNARAJAH; SCHARF; SCHARF, 2015).

Os fabricantes asseguram que a vida útil da bateria de íons de lítio é durável conforme a vida útil do carro elétrico, equivalendo a uma rodagem de aproximadamente 160.000 km (NEALER et. al., 2015). Dessa forma, um VE utilizará apenas uma bateria, caso não haja defeitos, isentando a necessidade de troca (EPE, 2019).

O sódio é abundante em todos os continentes e no ambiente marinho, e está com grande potencial no futuro da energia. Estudos estimam que este componente poderá substituir as baterias de lítio em até 25% (SOCIENTÍFICA, 2023).

Pesquisadores da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) estão avançando no primeiro protótipo brasileiro de uma bateria de sódio. No momento, somente a China está ofertando baterias comerciais de Na. No Brasil, o projeto é parte do Centro de Inovação em Novas Energias (Cine) e tem objetivo de produzir

baterias de sódio com capacidade para 1 Ah e módulos energéticos para armazenar 1,2 kWh (SOCIENTÍFICA, 2023).

Em determinados pontos, as baterias de lítio e de sódio possuem similaridades como, por exemplo, nos dois sistemas os íons transportam e estocam elétrons durante a carga e descarga da bateria. A principal distinção é o íon de sódio ser maior em relação ao íon de lítio, ou seja, o processo tem de ser apropriado às particularidades dos íons maiores. Nas baterias de lítio, o ânodo é constituído de grafite e nas de sódio a estrutura é carbonada (SOCIENTIFICA, 2023).

Ainda segundo o autor, as baterias de lítio possuem uma capacidade energética de 30% por volume físico em relação às de sódio. O principal impasse é a sua sustentabilidade a longo prazo, onde elas podem produzir até três vezes mais ciclos energéticos durante a sua vida útil, em relação às baterias de sódio, porém, suas reservas são limitadas. Em contrapartida, o sódio encontra-se disponível no mundo inteiro, sendo economicamente viável numa escala alta quando comparado ao lítio.

A Geotab (2023) realizou um estudo com 6.300 veículos elétricos de frota e de consumo de principais fabricantes e modelos com objetivo de avaliar a integridade da bateria. Os resultados apontaram que as baterias apresentam altos níveis de integridade sustentada. Caso as taxas de degradação que foram acompanhadas permaneçam, a maior parte das baterias operará além da vida útil do veículo.

A composição química irá influenciar a maneira como a bateria reage ao estresse. Além da composição química das células, as técnicas de controle de temperatura são distintas conforme os modelos de carros elétricos. Uma diferença importante está no fato de a bateria ser resfriada e/ou aquecida por ar ou por líquido (GEOTAB, 2023).

Outro motivo que difere a integridade da bateria entre fabricantes é como o estado de carga (SOC) é controlado. A bateria trabalhar quase cheia ou vazia implica em sua integridade. Afim de diminuir esse efeito, muitas fabricantes implementam um *buffer*, que impossibilita o acesso às extremidades superior e inferior da janela de SOC. Além dos *buffers* de proteção, muitos carros elétricos propiciam a opção de interromper o carregamento diário normal a um nível abaixo de 100% (GEOTAB, 2023).

5.3 LOGÍSTICA REVERSA

No Brasil, a produção de carros híbridos ou elétricos tem se elevado nos últimos dez anos. Entretanto, a falta de regulamentação adequada de logística reversa para baterias de veículos elétricos no país, poderá acarretar riscos ambientais significativos, ainda que tenha o impacto positivo da tecnologia atuando na redução de gases de efeito estufa, de acordo com estudo realizado pela Universidade Veiga de Almeida em 2022 (AGÊNCIA BRASIL, 2023).

Adotar a logística reversa para baterias de carros elétricos trará benefícios para a indústria como com o reaproveitamento de materiais e com a minimização das contaminações de recursos naturais. Sendo assim, ela estará seguindo o processo de destinação final de maneira sustentável como: oportunidade de reuso, reciclagem e/ou aterro sanitário (EPE, 2019).

A reciclagem de baterias de íons de lítio é complexa, devido à quantidade de componentes (que podem ser tóxicos). Os materiais estão em pó, envolvidos por lâminas metálicas em cada célula. Cada componente deve ser segregado no processo de reciclagem (GAINES, 2014) e, caso haja alguns que não possam ser reciclados, estes deverão ser enviado para aterros sanitários.

Quando as baterias de carros elétricos são descartadas irregularmente, levam a um passivo ambiental, gerando custos decorrentes dos danos causados ao meio ambiente e à saúde pública (PORTAL DA INDÚSTRIA, 2023).

Em 2021 a empresa brasileira Energy Source lançou um processo de reuso, reciclagem e reparo de baterias de lítio, sendo mundialmente pioneira ao ofertar esses processos em apenas um lugar. A instituição possui capacidade de processar até 300 ton de baterias mensalmente (PORTAL DA INDÚSTRIA, 2023).

A Energy Source iniciou as atividades de reuso visando uma finalidade diferente da original a baterias com capacidades energéticas esgotadas como, por exemplo, utilizar como bateria estacionária de lítio com custo acessível (PORTAL DA INDÚSTRIA, 2023).

Ainda segundo o autor, em 2019 a organização iniciou um trabalho com baterias de carros elétricos, sendo que essas passam por um algoritmo de inteligência artificial, o qual fornece o estado de vida do módulo em avaliação para que possa ser reutilizado em uma nova aplicação. De acordo com o CEO David

Noronha, o produto é transformado em bateria para energia solar ou para backup de energia para estação de recarga de carro elétrico.

A multinacional brasileira Tupy anunciou em novembro de 2024 uma planta-piloto de reciclagem de baterias, sendo o projeto desenvolvido em parceria com a Universidade de São Paulo (USP) e a Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (Embrapii) desde 2021 (VALOR ECONÔMICO, 2024).

Ainda segundo o autor, a planta-piloto operará no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) em São Paulo e, além disso, será a primeira a utilizar uma tecnologia de hidrometalurgia flexível, ou seja, capaz de processar em um mesmo lote, as várias composições químicas das baterias disponibilizadas no mercado.

O processo da hidrometalurgia necessita de menos energia para operar, o que viabiliza um reaproveitamento maior dos materiais das baterias, incluindo o lítio, o qual não é restaurado em processos convencionais (VALOR ECONÔMICO, 2024).

A Tupy anunciou que esta instalação irá permitir uma evolução no desenvolvimento do processo, devido a resultados satisfatórios obtidos em laboratório, sendo que na primeira fase, foi possível ter uma recuperação de 20% de metais raros (VALOR ECONÔMICO, 2024).

Um estudo específico abordando sobre as baterias de sódio não foi encontrado, entretanto, acredita-se que o processo de reciclagem e logística reversa deverá ser o mesmo futuramente, quando as baterias de sódio estiverem sendo comercializadas com maior demanda.

Conforme o Art. 30 da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010):

É instituída a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, a ser implementada de forma individualizada e encadeada, abrangendo os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, os consumidores e os titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos, consoante as atribuições e procedimentos previstos nesta Seção.

A normativa ainda ressalta no parágrafo único que a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos tem por objetivo:

II - promover o aproveitamento de resíduos sólidos, direcionando-os para a sua cadeia produtiva ou para outras cadeias produtivas;

III - reduzir a geração de resíduos sólidos, o desperdício de materiais, a poluição e os danos ambientais;

IV - incentivar a utilização de insumos de menor agressividade ao meio ambiente e de maior sustentabilidade;

V - estimular o desenvolvimento de mercado, a produção e o consumo de produtos derivados de materiais reciclados e recicláveis;

VI - propiciar que as atividades produtivas alcancem eficiência e sustentabilidade;

VII - incentivar as boas práticas de responsabilidade socioambiental.

5.4 DESCARTE FINAL

O descarte de baterias deve seguir a regulamentação da Resolução CONAMA nº 401/08, a qual diz:

Art. 14. Nos materiais publicitários e nas embalagens de pilhas e baterias, fabricadas no País ou importadas, deverão constar de forma clara, visível e em língua portuguesa, a simbologia indicativa da destinação adequada, as advertências sobre os riscos à saúde humana e ao meio ambiente, bem como a necessidade de, após seu uso, serem encaminhadas aos revendedores ou à rede de assistência técnica autorizada, conforme Anexo I.

Art. 15. Os fabricantes e importadores de produtos que incorporem pilhas e baterias deverão informar aos consumidores sobre como proceder quanto à remoção destas pilhas e baterias após a sua utilização, possibilitando sua destinação separadamente dos aparelhos.

Parágrafo único. Nos casos em que a remoção das pilhas ou baterias não for possível, oferecer risco ao consumidor ou, quando forem parte integrante e não removíveis do produto, o fabricante ou importador deverá obedecer aos critérios desta Resolução quanto à coleta e sua destinação ambientalmente adequada, sem prejuízo da obrigação de informar devidamente o consumidor sobre esses riscos.

Em 2021, o Senado Feral apresentou o Projeto de Lei (PL) nº 2.327/2021 com abordagem específica sobre logística reversa de baterias de lítio, visando

alterar a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei n 12.305/2010), para incluir no seu corpo, a adoção da logística reversa para baterias de veículos elétricos.

Dessa forma, a responsabilidade pelo reaproveitamento e pelo destino final das baterias, por hora, são dos fabricantes. Além disso, é um dever do fabricante e do importador garantir que os produtos estejam com informações claras e de fácil interpretação para que o consumidor final saiba como proceder quando as baterias chegarem ao final do seu tempo de vida útil em um veículo.

6. CONCLUSÃO

O estudo apresentado evidenciou que os impactos ambientais causados pelas baterias de íons de lítio são maiores em relação aos das baterias de íons de sódio, no que diz respeito à extração da matéria-prima.

No Brasil, a fabricação de baterias à base de íons de sódio não é comum como na China. Porém, estudos nacionais estão em desenvolvimento para que a sua comercialização seja viável num futuro próximo.

Uma bateria de carro elétrico pode ter seu tempo de vida útil variado conforme fatores de utilização, composição química, condições de carregamento, dentre outros, que podem afetar a sua integridade a longo prazo.

A bateria de íons de lítio possui uma capacidade energética maior em relação à bateria de íons de sódio. Porém, ao pensar na sustentabilidade a longo prazo, a bateria à base de lítio, produz até três ciclos a mais durante a sua vida útil, entretanto, suas reservas são limitadas. O sódio, por outro lado, possui reservas no mundo todo, possibilitando sua viabilidade econômica em uma escala alta.

Ao tratar da logística reversa, foi possível constatar que ainda não se tem uma regulamentação adequada para baterias de veículos elétricos no Brasil, o que leva a riscos ambientais importantes, mesmo a tecnologia impactando positivamente em relação à emissão de gases de efeito estufa.

Dessa forma, implementar ações públicas e dar maior atenção ao tema que avança cada vez mais no Brasil e no mundo, regulamentações nacionais e globais devem ser desenvolvidas, para que se conversem, porém, ao mesmo tempo, sejam adequadas à cada realidade.

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) e a Resolução CONAMA nº 401/2008 são grandes instrumentos que norteiam fabricantes e consumidores sobre responsabilidades e como fazer o descarte correto, porém ainda assim, é necessária uma instrumentalização específica para baterias de veículos elétricos como, por exemplo, o Projeto de Lei nº 2.327/2021 que foi apresentado pelo Senado Federal abordando instruções específicas sobre a logística reversa de baterias de lítio, visto ser o modelo mais comercializado atualmente no Brasil.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA BRASIL. **Destino errado de bateria de carro elétrico põe em risco meio ambiente.** 2023. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2023-05/destino-errado-de-bateria-de-carro-eletrico-poe-em-risco-meio-ambiente>> Acesso em: 30 out. 2024.

AIDA. **Lítio: :O que é, de onde vem e quais as consequências de sua extração?** 2024. Disponível em: <<https://aida-americas.org/es/blog/litio-o-que-e-de-onde-vem-e-quais-consequencias-de-sua-extracao>> Acesso em: 29 out. 2024.

ALECRIM, J. D. **Recursos Minerais do Estado de Minas Gerais.** 1982. Belo Horizonte, Metamig, 298 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO VEÍCULO ELÉTRICO (ABVE). **Com vendas de junho, mercado bate em 80 mil eletrificados no 1º semestre e 300 mil em circulação.** 2024. Disponível em: <<https://abve.org.br/80-mil-eletrificados-so-no-primeiro-semester/>> Acesso em: 04 jul. 2024.

AZEVEDO, M. H. **Carros elétricos: viabilidade econômica e ambiental de inserção competitiva no mercado brasileiro.** 54 f. Monografia. Curso de Engenharia de Controle e Automação, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução CONAMA nº 401, de 4 de novembro de 2008. Estabelece os limites máximos de chumbo, cádmio e mercúrio para pilhas e baterias comercializadas no território nacional e os critérios e padrões para o seu gerenciamento ambientalmente adequado, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, n. 215, 05 de nov. 2008. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/6191772/resolucao-conama-n-401-de-4-de-novembro-de-2008>> Acesso em 14 dez. 2024.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; Altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos**, Brasília, DF, 03 de agosto de 2010, p. 1.

CÁRITAS BRASILEIRA. **Comunidade do Vale do Jequitinhonha sofrem com impactos socioambientais da “Corrida do Lítio”**. 2024. Disponível em: <<https://mg.caritas.org.br/noticias/comunidades-do-vale-do-jequitinhonha-sofrem-com-impactos-socioambientais-da-corrída-do-lítio>> Acesso em: 11 set. 2024.

CASTRO, B. H. R.; BARROS, D. C.; VEIGA, S. G. Baterias automotivas: panorama da indústria no Brasil, as novas tecnologias e como os veículos elétricos podem transformar o mercado global. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 37, 443-496 p., mar. 2013.

CICLO VIVO. **Baterias de carros elétricos viram sistema de armazenamento de energia**. 2024. Disponível em: <<https://ciclovivo.com.br/inovacao/tecnologia/baterias-de-carros-eletricos-viram-sistema-de-armazenamento-de-energia/>> Acesso em: 17 ago. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Estudos de longo prazo: Eletromobilidade e biocombustíveis**. 2019. 49 p.

FVG ENERGIA. Carros elétricos. **FGV ENERGIA**, Rio de Janeiro, ano 4, n. 7, 112 p., maio 2017. Disponível em: <https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/caderno_carros_eletricos-fgv-book.pdf> Acesso em: 14 dez. 2024.

GAINES, L (2014). The future of automotive lithium-ion battery recycling: Charting a sustainable course Sustainable Materials and Technologies. **Elsevier B.V**, Lemont, v. 1-2, p. 2-7, dec. 2014. DOI. 10.1016/j.susmat.2014.10.001.

GEOTAB. O que 6 mil veículos elétricos podem nos dizer sobre a integridade da bateria? Disponível em: < <https://www.geotab.com/pt-br/blog/degradacao-da-bateria-veiculos-eletricos/>> Acesso em: 14 dez. 2024.

GREEN ELETRON. **Reciclagem de baterias de lítio acontece no Brasil. Saiba mais!** 2023. Disponível em: <<https://greeneletron.org.br/blog/reciclagem-de-baterias-de-litio-acontece-no-brasil-saiba-mais/#:~:text=A%20reciclagem%20proporciona%20um%20%C3%ADndice,l%C3%ADtio%2C%20segundo%20a%20Energy%20Source>> Acesso em: 30 out. 2024.

INSTITUTO FEDERAL DO MARANHÃO (IFMA). Estudo aponta como reduzir danos ambientais nas salinas. 2020. Disponível em: <<https://carolina.ifma.edu.br/2020/05/11/estudo-aponta-como-reduzir-danos-ambientais-nas-salinas/#:~:text=Apesar%20da%20import%C3%A2ncia%20socioecon%C3%B4mica%2C%20a,costeiros%20como%20manguezais%20e%20Apicuns>> Acesso em: 29. out. 2024.

INSTITUTE FÜR SELTENE ERDEN UND METALLE AG. **Sódio.** Disponível em: <<https://pt.institut-seltene-erden.de/seltene-erden-und-metalle/strategische-metalle-2/natrium/#:~:text=Extra%C3%A7%C3%A3o%20e%20apresenta%C3%A7%C3%A3o,como%20a%20%C3%A1gua%20do%20mar>> Acesso em: 29 out. 2024.

JORNAL DA USP. **Sustentabilidade: descarte de baterias dos carros elétricos ainda precisa ser aperfeiçoado.** 2022. Disponível em: <<https://jornal.usp.br/campus-ribeirao-preto/sustentabilidade-descarte-de-baterias-dos-carros-eletricos-ainda-precisa-ser-aperfeicoado/>> Acesso em: 04 jul. 2024.

JORNAL DA USP. **Brasil possui grande potencial na extração de lítio, mas precisa aprimorar a infraestrutura.** 2024. Disponível em <<https://jornal.usp.br/radio-usp/brasil-possui-grande-potencial-na-extracao-de-litio-mas-precisa-aprimorar-a-logistica/#:~:text=Existem%20no%20territ%C3%B3rio%20brasileiro%20duas,no%>>

20Nordeste%20brasileiro%E2%80%9D%2C%20explica.> Acesso em: 29 out. 2024.

LEWKOWICZ, J. O lítio pode ser extraído com menos impacto ambiental? **Dialogue Earth**. 20 set. 2022. Disponível em: <<https://dialogue.earth/pt-br/nao-categorizado/58865-can-lithium-be-produced-with-lower-environmental-impact-latin-america/>> Acesso em 14 dez. 2024.

MEDIA GM. **Baterias e EVS da GM já alcançam 95% de reciclabilidade**. 2023. Disponível em: <<https://media.gm.com/media/br/pt/chevrolet/home.detail.html/content/Pages/news/br/pt/2023/jul/0727-baterias.html>> Acesso em: 17 ago. 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIAS. **Lítio: o material estratégico que é protagonista na transição energética**. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/litio-o-mineral-estrategico-que-e-protagonista-na-transicao-energetica>> Acesso em: 11 set. 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Minerais são matérias-primas para confecção de baterias de carros elétricos**. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/minerais-sao-materia-primas-para-confeccao-de-baterias-de-carros-eletricos>> Acesso em: 04 jul. 2024.

NATKUNARAJAH, Nirugaa.; SCHARF, Matthias; SCHARF, Peter. Scenarios for the return of lithium-ion batteries out of electric cars for recycling. **Procedia CIRP**, 2015. DOI: doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.170.

NEALER, Rachael; REICHMUTH, David; ANAIR, Don.. Cleaner Cars from Cradle to Grave: How Electric Cars Beat Gasoline Cars on Lifetime Global Warming Emissions. **Union Concerned Scientists**, November 2015, DOI: [10.13140/RG.2.1.4583.3680](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4583.3680).

Cleaner Cars from Cradle to Grave, 1–54.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4583.3680>

NEOCHARGE. **Bateria de um veículo elétrico.** Disponível em: <<https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/bateria-veiculo-eletrico#:~:text=Nos%20ve%C3%ADculos%20el%C3%A9tricos%20a%20bateria%2C%20tamb%C3%A9m%20chamados,de%20acess%C3%B3rios%20internos%2C%20assim%20como%20todos%20os>> Acesso em: 17 ago. 2024.

PORTAL DA INDÚSTRIA. **Brasil é pioneiro em solução completa para reciclagem de bateria de carro elétrico.** 2023. Disponível em: <<https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/sustentabilidade/brasil-e-pioneiro-em-solucao-completa-para-reciclagem-de-bateria-de-carro-eletrico/>> Acesso em: 15 nov. 2024.

PV MAGAZINE GLOBAL. **China liga primeira bateria de íon de sódio em grande escala.** 2024. Disponível em: <<https://www.pv-magazine-brasil.com/2024/05/16/china-liga-primeira-bateria-de-ion-de-sodio-em-grande-escala/>> Acesso em: 29 out. 2024.

REUTER, G. O dilema da extração do lítio usado em carros elétricos. **DW**, Março 2023. Disponível em: <<https://www.dw.com/pt-br/o-dilema-da-extra%C3%A7%C3%A3o-do-l%C3%ADtio-usado-em-carros-el%C3%A9tricos/a-64994503#:~:text=O%20min%C3%A9rio%20de%20l%C3%ADtio%20%C3%A9,um%20processo%20qu%C3%ADmico%20e%20metal%C3%BArgico.&text=O%20pr%C3%B3ximo%20passo%20%C3%A9%20transportar,transformado%20em%20c%C3%A9lulas%20de%20bateria>> Acesso em: 14 dez. 2024..

ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY. **Sodium.** Disponível em: <<https://www.rsc.org/periodic-table/element/11/sodium>> Acesso em: 29 out. 2024.

SIEMENS. **Carros elétricos: como funcionam, vantagens e tipos.** 2024. Disponível em: <<https://www.siemens.com/br/pt/empresa/stories/cidades/carros-eletricos-como-funcionam-vantagens-e-tipos.html>> Acesso em: 03 jul.2024.

SOCIENTIFICA. **Brasileiros criam bateria de sódio como uma alternativa ao lítio.** 2023. Disponível em: <<https://socientifica.com.br/brasileiros-criam-bateria-de-sodio-como-uma-alternativa-ao-litio/>> Acesso em: 15 nov. 2024.

VALOR ECONÔMICO. **Tupy anuncia planta-piloto de reciclagem de baterias com investimentos de R\$ 12,3 milhões.** 2024. Disponível em <<https://valor.globo.com/google/amp/empresas/noticia/2024/11/13/tupy-anuncia-planta-piloto-de-reciclagem-de-baterias-com-investimentos-de-r-123-milhes.ghtml>> Acesso em: 14 dez. 2024.

ZAPAROLLI, D. Pesquisadores brasileiros desenvolvem bateria à base de sódio. **Revista Pesquisa FAPESP**, Publicado online, edição 329, 2023. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/pesquisadores-brasileiros-desenvolvem-bateria-a-base-de-sodio/>> Acesso em 03 jul. 2024.