

Descarte e reciclagem de baterias de veículos elétricos

Diogo Luiz Faustino Nogueira

Francielli Scarpini Barbosa Cordeiro

Resumo

Este estudo explora a reciclagem de baterias de veículos elétricos, destacando a importância da economia circular na redução de resíduos e otimização de recursos. Com o objetivo de analisar a viabilidade e os impactos ambientais dessa prática, utilizamos uma abordagem metodológica baseada em análise de caso, especialmente a tecnologia Spoke & Hub™ da Li-Cycle. Os resultados mostram que a reciclagem eficaz minimiza a extração de novas matérias-primas e os impactos ambientais negativos, enquanto a reutilização das baterias em sistemas de armazenamento de energia e em veículos menos exigentes amplia seu ciclo de vida. Adotar tecnologias avançadas de reciclagem e estratégias de segunda vida é crucial para criar uma cadeia de suprimentos sustentável e fechar o ciclo dos materiais das baterias, promovendo benefícios ambientais e econômicos significativos.

Palavras-chave: veículos elétricos; baterias; impacto ambiental; reciclagem.

Abstract

This study explores the recycling of electric vehicle batteries, emphasizing the importance of the circular economy in waste reduction and resource optimization. Aiming to analyze the feasibility and environmental impacts of this practice, we employed a case analysis approach, particularly focusing on Li-Cycle's Spoke & Hub™ technology. The results demonstrate that effective recycling reduces the extraction of new raw materials and mitigates negative environmental impacts, while the reuse of batteries in energy storage systems and less demanding vehicles extends their lifecycle. Adopting advanced recycling technologies and second-life strategies is crucial for creating a sustainable supply chain and closing the loop on battery materials, thereby promoting significant environmental and economic benefits.

Keywords: *Electric vehicles; batteries; environmental impact; recycling.*

1. Introdução

Nos últimos anos, o cenário global de mobilidade tem passado por transformações significativas impulsionadas pela necessidade premente de mitigar as mudanças climáticas e reduzir a dependência de combustíveis fósseis. Nesse contexto, os veículos elétricos surgiram como uma alternativa promissora, oferecendo uma solução ambientalmente mais sustentável para os meios de transportes. No entanto, à medida que a popularidade dos veículos elétricos cresce, surge uma preocupação crucial: o descarte e reciclagem adequados das baterias (GRANDA, 2022).

As baterias de íon de lítio têm um papel fundamental na viabilidade dos veículos elétricos, proporcionando armazenamento de energia eficiente e confiável. Contudo, a sua produção e descarte inadequados podem resultar em sérios danos ambientais. A necessidade de entender e implementar práticas eficazes de descarte e reciclagem para essas baterias tornou-se uma preocupação urgente, não apenas para combater os impactos negativos no meio ambiente, mas também para aproveitar os materiais valiosos contidos nas baterias, reduzindo a demanda por recursos naturais (GRANDA, 2022).

A crescente produção de carros híbridos e elétricos no Brasil nas últimas décadas trouxe consigo benefícios ambientais inegáveis, como a redução das emissões de gases de efeito estufa. Contudo, um desafio significativo surge em meio a esse progresso: a falta de uma eficiente logística reversa para as baterias desses veículos. Um estudo conduzido pela Universidade Veiga de Almeida (2022), ressalta que atualmente existem mais de 100 mil veículos híbridos e elétricos circulando no país, cujas baterias totalizam aproximadamente 34 mil toneladas. Destas, pelo menos 30 mil toneladas já alcançaram o fim de sua vida útil, representando um sério risco ambiental.

Segundo o professor Carlos Eduardo Canejo (2022), a durabilidade das baterias varia conforme o modelo e tipo, mas uma característica comum é seu peso substancial, uma bateria típica de veículo elétrico pode pesar entre 200 e 300 kg, com uma vida útil variando de dez a quinze anos.

Em todo o mundo, o aumento na produção e adoção de veículos elétricos tem sido acompanhado por um dilema ambiental significativo: como gerenciar as baterias desses automóveis ao fim de sua vida útil (GRANDA, 2022)..

Países como a Noruega e iniciativas da União Européia estabeleceram metas ambiciosas para a transição para veículos elétricos, forçando um confronto urgente com a gestão adequada dos resíduos que esses veículos geram. Enquanto as baterias de veículos a combustão tradicionais são relativamente leves, as baterias de veículos elétricos, que

pesam centenas de quilos, representam um desafio logístico e ambiental significativo (GRANDA, 2022)..

A necessidade de políticas regulatórias abrangentes, bem como a colaboração entre setores público e privado em escala global, torna-se crucial. O desenvolvimento de sistemas de logística reversa escaláveis e eficientes, juntamente com investimentos em tecnologias de reciclagem inovadoras, são essenciais para transformar esse problema em uma oportunidade. Ao abordar esses desafios com criatividade e compromisso, é possível não apenas diminuir os riscos ambientais associados às baterias de veículos elétricos, mas também abrir caminho para uma economia circular mais sustentável e responsável (GRANDA, 2022)..

1.1 Objetivos

Os objetivos deste estudo serão divididos em gerais e específicos, visando uma abordagem abrangente e direcionada. Os objetivos gerais pretendem compreender o impacto ambiental da reciclagem de baterias de veículos elétricos e avaliar sua viabilidade econômica. Já os objetivos específicos buscarão analisar os métodos de reciclagem disponíveis, identificar os principais impactos ambientais associados a esses processos e propor estratégias para melhorar a eficiência da reciclagem, considerando a economia circular.

1.1.1 Objetivos Gerais

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma investigação aprofundada sobre a gestão de resíduos provenientes de baterias de veículos elétricos, com foco não apenas em políticas regulatórias, mas também nas soluções inovadoras para o reaproveitamento dos materiais dessas baterias na reciclagem.

1.1.2 Objetivos Específicos

- **Analisar a Composição das Baterias:** Investigar a composição química das baterias de veículos elétricos para entender os materiais presentes, como lítio (Li), cobalto (Co), níquel (Ni), alumínio (Al) etc.
- **Estudar Tecnologias de Reciclagem:** Pesquisar e avaliar tecnologias, bem como métodos inovadores de reciclagem, para identificar processos eficientes na extração de materiais valiosos das baterias.
- **Propor Estratégias de Economia Circular:** Desenvolver estratégias para implementar práticas de economia circular na gestão de resíduos de baterias, focando na reutilização de materiais para criar novos produtos.

- **Analisar Impactos Ambientais e Econômicos:** Investigar os impactos ambientais e econômicos das soluções de reciclagem propostas, para determinar a viabilidade e sustentabilidade das abordagens propostas.

1.2 Definição do Problema

O crescente aumento na produção e adoção de veículos elétricos trouxe consigo uma preocupação urgente: como descartar e reciclar adequadamente as baterias que atingem o final de sua vida útil. A ausência de regulamentações específicas, tecnologias de reciclagem avançadas e práticas de economia circular eficientes resulta em sérios impactos ambientais, como a contaminação do solo e da água devido aos componentes tóxicos das baterias. Além disso, o descarte inadequado representa uma perda significativa de recursos valiosos, como lítio (Li), cobalto (Co) e níquel (Ni), que poderiam ser reutilizados em novos produtos. Este problema complexo exige uma abordagem multidisciplinar que englobe análises dos impactos ambientais, soluções tecnológicas inovadoras e estratégias de regulamentação que promovam a transição para práticas mais sustentáveis na gestão dos resíduos de baterias de veículos elétricos.

2. Desenvolvimento Sustentável na Gestão de Resíduos de Baterias de Veículos Elétricos.

O crescente uso de veículos elétricos tem gerado um desafio significativo: a gestão adequada dos resíduos provenientes de suas baterias. Com mais de 100 mil veículos elétricos em circulação no Brasil (Carlos Eduardo Canejo, 2022) e a composição complexa dessas baterias, é necessário compreender sua composição química. Nesse sentido, o desenvolvimento de tecnologias de reciclagem inovadoras, capazes de extrair materiais valiosos como lítio, cobalto e níquel, se torna uma prioridade. Além disso, propor estratégias que favoreçam a economia circular, procurando a possibilidade de reutilização desses materiais para criar novos produtos.

2.1 Composição das Baterias de Veículos Elétricos

As baterias dos veículos elétricos representam uma peça fundamental na revolução da mobilidade sustentável. Comumente compostas por células de íon-lítio, estas baterias são uma combinação complexa de materiais, abrangendo desde elementos valiosos como lítio, cobalto, níquel e alumínio até componentes como plástico e aço. Essa composição

diversificada é essencial para o funcionamento eficiente dos veículos elétricos (Tupinambá, 2022).

As baterias de íon-lítio são amplamente utilizadas na indústria de veículos elétricos devido à sua alta eficiência e desempenho. Frequentemente presentes em aparelhos eletrônicos, essas baterias se destacam pela capacidade de reter carga por mais tempo e funcionar de maneira eficiente em ambientes de alta temperatura, tornando-as uma escolha preferencial na fabricação de veículos elétricos devido à possibilidade de reciclar seus elementos (Tupinambá, 2023).

As baterias são sistemas eletroquímicos que armazenam e convertem energia química em energia elétrica. Elas consistem em várias pilhas agrupadas, conectadas em série para potencial maior ou em paralelo para mais corrente elétrica. Para compreender o funcionamento das baterias, é crucial entender os conceitos químicos presentes nas pilhas. Elas são constituídas por dois eletrodos: o ânodo, onde ocorrem reações de oxidação (perda de elétrons), e o cátodo, onde acontecem reações de redução (ganho de elétrons). Estes eletrodos estão imersos em um eletrólito e, quando conectados a um sistema elétrico, geram uma corrente elétrica (Livia Salles, 2022).

As baterias de íon-lítio se destacam pela densidade energética, ciclo de vida longo e a ausência do "vício da bateria" presente em dispositivos mais antigos. Elas são compostas principalmente por grafite no ânodo, enquanto o cátodo possui diversas composições químicas, concentrando lítio e metais valiosos como cobalto e manganês (Livia Salles, 2022).

Existem diferentes composições químicas da bateria de lítio, o que dificulta sua reutilização e reciclagem. O eletrólito comum é um sal condutor iônico, enquanto o ânodo é geralmente fabricado de grafite. Já os cátodos variam, e para carros elétricos, são utilizadas composições como LiMn_2O_4 (LMO), LiFePO_4 (LFP) entre outras (Jean-Paul Skeete, 2020). Para maximizar a carga disponível, as baterias são construídas em camadas de eletrodos e eletrólitos, formando células que são combinadas em módulos.

As baterias de íons de lítio, apresentam uma composição variada, com cerca de 8 kg de lítio, 35 kg de níquel, 20 kg de manganês e 14 kg de cobalto em sua estrutura (Davide Castelvechi, 2021). Esses valores representam uma aproximação das quantidades típicas desses materiais em uma única bateria para veículos. No entanto, a composição pode variar de acordo com diferentes tipos e modelos de baterias, com foco no aprimoramento dos processos de reciclagem para garantir a reutilização eficiente desses componentes valiosos. Essa necessidade de otimizar os materiais nas baterias e aprimorar a reciclagem reflete a transição para veículos elétricos e o desejo de minimizar impactos ambientais associados ao descarte das baterias (Davide Castelvechi, 2021).

2.2 Tecnologias de Reciclagem

As tecnologias de reciclagem para baterias de íon-lítio de veículos elétricos desempenham um papel crucial na sustentabilidade ambiental e na gestão eficiente de recursos. Com base em uma abordagem multifacetada, os métodos de reciclagem desenvolvidos visam recuperar materiais valiosos presentes nessas baterias complexas.

Esses métodos variam desde processos de separação química até técnicas físicas e térmicas, cada um com suas próprias eficiências e desafios específicos. Ao considerar a diversidade de materiais e o constante aprimoramento no design das baterias, a eficácia das tecnologias de reciclagem se torna uma questão crucial para garantir uma cadeia sustentável de produção e descarte de baterias de íon-lítio (Patrícia Urias, 2017).

A eficiência das tecnologias de reciclagem de baterias de íon-lítio para veículos elétricos depende de uma série de fatores, desde a complexidade do design das baterias até os métodos específicos de processamento. Os métodos mais comuns envolvem processos de pirometalurgia, hidrometalurgia e reciclagem direta, cada um com suas vantagens e limitações. A busca pela otimização desses métodos está direcionada não apenas para a recuperação eficaz de materiais valiosos, mas também para minimizar o impacto ambiental e energético associado à produção e descarte dessas baterias. Com a constante evolução tecnológica e a necessidade premente de soluções sustentáveis, a pesquisa e desenvolvimento contínuos nessas tecnologias se tornam essenciais para a construção de um ciclo de vida eficiente e ambientalmente responsável para as baterias de veículos elétricos.

Os métodos de reciclagem de baterias de íon-lítio abrangem uma variedade de processos. A pirometalurgia, por exemplo, envolve a fusão das baterias a altas temperaturas, separando os componentes com base em seus pontos de fusão. Esse método pode recuperar metais como cobre, cobalto e níquel, mas pode gerar emissões significativas e nem sempre é eficaz na recuperação de materiais valiosos. Já a hidrometalurgia utiliza soluções químicas para dissolver os materiais ativos das baterias, permitindo a recuperação de metais como lítio, cobalto e níquel em formas mais puras. Enquanto isso, a reciclagem direta se concentra na desmontagem mecânica das baterias para separar os componentes, embora esse processo possa limitar a recuperação de materiais em sua totalidade (Patrícia Urias, 2017).

Os resultados variam dependendo do método de reciclagem. Em média, a reciclagem de baterias de íon-lítio pode recuperar até 80% do cobalto e do níquel presentes nas células, juntamente com quantidades significativas de manganês e alumínio. No entanto, outros materiais, como o grafite e o lítio, podem apresentar desafios maiores de recuperação devido à sua natureza mais dispersa nas estruturas das células. A otimização contínua dos processos de reciclagem busca melhorar essas taxas de recuperação e garantir que a maior quantidade

possível de materiais valiosos seja reutilizada na produção de novas baterias (Patrícia Urias, 2017).

Além da quantidade de material recuperado, a qualidade desse material é fundamental para a reutilização eficaz. A reciclagem bem-sucedida não apenas se concentra na quantidade recuperada, mas também na pureza e na capacidade de reintegrar esses materiais de maneira eficiente na fabricação de novas baterias. O desafio reside não apenas em recuperar os materiais, mas em fazê-lo de forma economicamente viável e ambientalmente sustentável para garantir um ciclo de vida completo e eficiente para as baterias de íon-lítio.

2.2.1 Pirometalurgia

Os processos pirometalúrgicos aplicados na reciclagem de baterias englobam diversas técnicas, como incineração, fusão e pirólise. A incineração envolve a queima controlada dos componentes das baterias em fornos especiais, seguida pela fusão dos resíduos a altas temperaturas, permitindo a separação dos materiais. A pirólise, por sua vez, é um método de decomposição térmica em condições de baixo oxigênio, onde os materiais são aquecidos, quebrando moléculas e permitindo a separação de elementos (Patrícia Urias, 2017).

Embora esses métodos sejam eficientes na recuperação de metais valiosos, como lítio, cobalto e níquel, enfrentam desafios ambientais consideráveis, como a geração de emissões gasosas prejudiciais, a limitada eficiência na recuperação de certos metais e a possibilidade de perda de metais durante o processamento (Patrícia Urias, 2017).

Um exemplo é a unidade de processamento da BATREC que oferece soluções abrangentes para reciclagem de diferentes tipos de baterias, desde alcalinas, Zn-air, Zn-C e de baterias de lítio (como LiMnO₂ ou Li-íon de telefones, bicicletas elétricas, veículos elétricos e ferramentas) e acumuladores NiMH. A unidade utiliza um processo térmico de duas etapas para recuperar materiais valiosos, realizando a pirólise de compostos orgânicos a temperaturas de até 800°C, vaporizando mercúrio e água, extraíndo ferromanganês e escória, e condensando zinco (BATREC, 2021).

Esse processo em circuito fechado garante a conservação de recursos e evita riscos ambientais, cumprindo padrões rígidos de reciclagem para evitar a liberação de materiais

nocivos no ecossistema. A reciclagem de baterias usadas é realizada com atenção meticulosa aos requisitos ambientais (BATREC, 2021).

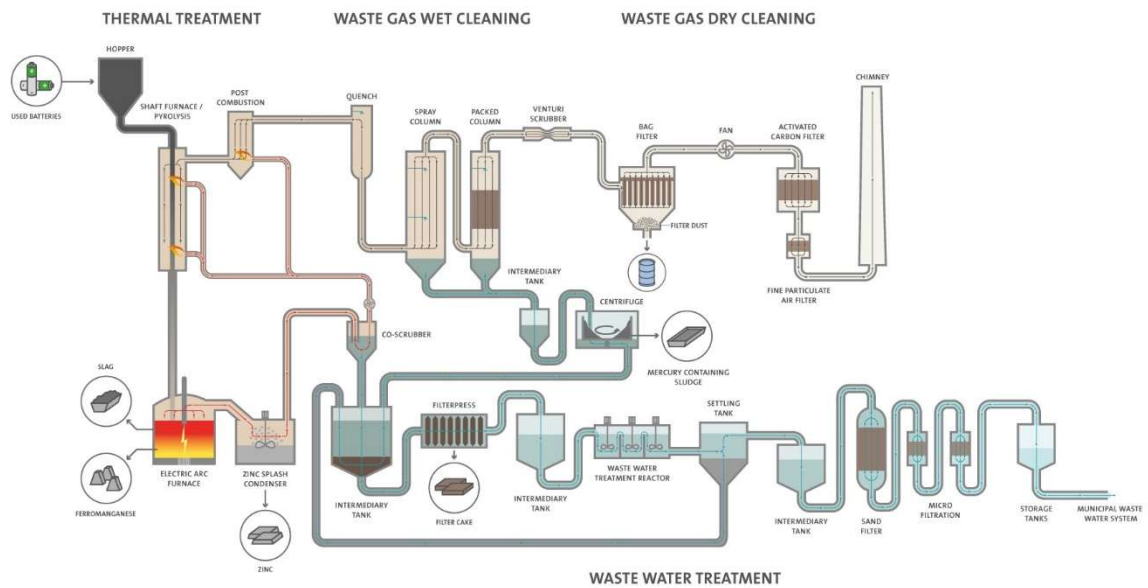


Figura 1 – Processo BATREC (BATREC ,2021).

O processo envolve três etapas-chave: a etapa de tratamento térmico, o processo de tratamento úmido de gases residuais e, por fim, a etapa de tratamento seco de gases residuais, todos detalhados no fluxograma da unidade de reciclagem de baterias da BATREC na Suíça conforme figura 1. Essa abordagem completa enfatiza a responsabilidade ambiental ao mesmo tempo em que recupera de maneira eficiente materiais valiosos (BATREC, 2021).

2.2.2 Hidrometalurgia

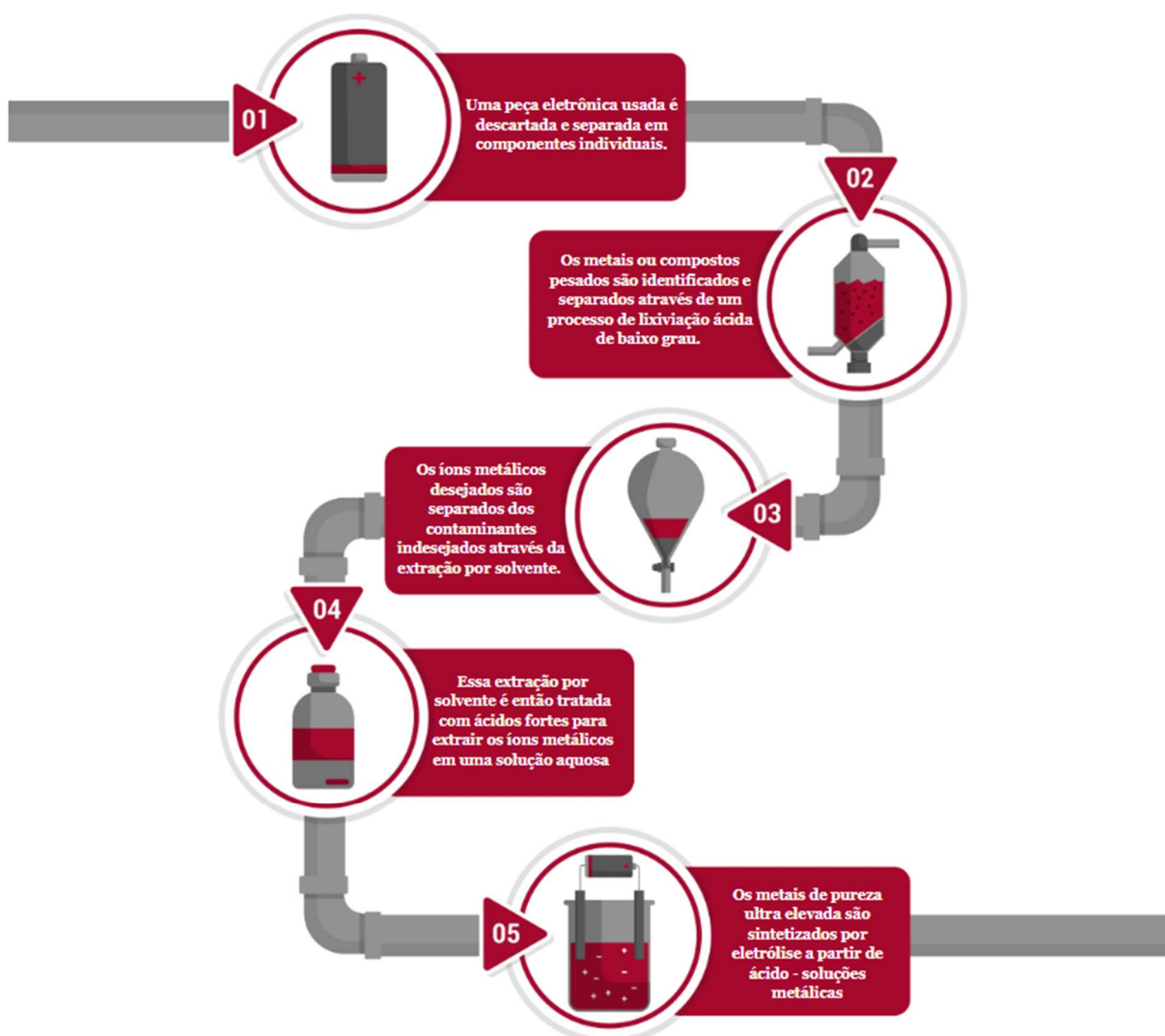


Figura 2 - Processo de extração de metais (REIS, 2023)

Como mostra a figura 2, os processos hidrometalúrgicos na reciclagem de baterias de íon-lítio constituem-se pela dissolução controlada dos componentes por meio de agentes líquidos, geralmente ácidos ou bases. Essa técnica envolve etapas de lixiviação onde ocorre a dissolução dos metais presentes nas baterias através de soluções aquosas ou agentes químicos específicos. Para otimizar o processo, variáveis como temperatura, tempo de reação, concentração de ácidos ou bases, proporção entre material e agente lixiviante, e uso de agentes redutores são cuidadosamente ajustadas (Patrícia Urias, 2017).

Apesar de oferecer vantagens ambientais em comparação com métodos pirometalúrgicos, como menor impacto na poluição atmosférica e consumo energético reduzido, os processos hidrometalúrgicos enfrentam desafios significativos. A complexidade na manipulação de resíduos eletrônicos, a necessidade de pré-tratamento, o volume

considerável de soluções necessárias para dissolver os metais e a geração de efluentes tóxicos são algumas das limitações desse método (Patrícia Urias, 2017).

Estudos experimentais têm visado otimizar as condições de lixiviação ácida para a recuperação eficiente de metais valiosos, como cobalto, lítio, níquel e manganês a partir das baterias de íon-lítio, evidenciando altas taxas de recuperação sob condições operacionais específicas. Essas pesquisas focam na utilização de diferentes agentes lixiviantes, como ácidos sulfúricos e clorídricos, e na identificação das condições ideais de processo para maximizar a recuperação dos metais preciosos presentes nessas baterias (Patrícia Urias, 2017).

2.2.3 Processo Híbrido – Pirometalurgia e Hidrometalurgia

O processo híbrido de recuperação de metais em baterias de íon-lítio é uma abordagem que combina diferentes técnicas visando tirar proveito das vantagens individuais de cada método. Esse tipo de sistema busca melhorar o rendimento global do processo, acelerar certas etapas, e minimizar os impactos ambientais, reduzindo emissões gasosas (comuns na pirometalurgia) ou a utilização de soluções tóxicas (comuns na hidrometalurgia), entre outras vantagens (Patrícia Urias, 2017).

Um estudo descrito por Patrícia Urias (2017), aplica conjuntamente processos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos no tratamento de lodo galvânico, rico em metais como cobre, cobalto e níquel. Condições otimizadas alcançadas nesse estudo, como a proporção específica entre lodo e agente surfactante, e temperatura de forno controlada, resultaram em extrações significativas de metais, como 67% de cobre e 49% de níquel.

É evidente que avanços significativos estão sendo feitos na tecnologia de reciclagem de baterias. A busca por métodos mais eficientes, sustentáveis e economicamente viáveis é fundamental para garantir um ciclo de vida mais completo e responsável para esses componentes vitais na era da mobilidade elétrica.

O contínuo investimento em pesquisa e desenvolvimento, aliado à inovação em processos de reciclagem e à implementação de práticas mais sustentáveis, é essencial para enfrentar os desafios futuros e garantir uma abordagem mais consciente em relação ao uso e reutilização desses recursos.

2.3 Economia Circular

A transição para a mobilidade elétrica tem apresentado discussões sobre a sustentabilidade dos recursos e a gestão eficiente dos materiais. Dentro desse contexto, a

Economia Circular surge como uma abordagem fundamental para a reciclagem das baterias de veículos elétricos, buscando minimizar o desperdício e maximizar a utilização de recursos. O cenário da reciclagem de baterias de íon de lítio torna-se especialmente relevante, dado o crescente volume desses dispositivos e a necessidade premente de gerir de forma inteligente seus componentes complexos, tais como lítio, cobalto, níquel e outros materiais valiosos.

A Economia Circular surge como uma solução inovadora, não apenas para tratar o descarte de baterias, mas para redefinir todo o ciclo de vida desses dispositivos, promovendo a recuperação eficiente de materiais, reduzindo o impacto ambiental e fomentando uma cadeia produtiva mais sustentável.

A implementação da Economia Circular no contexto da reciclagem de baterias de veículos elétricos visa a interrupção do modelo linear de consumo e descarte, propondo a reintrodução de materiais valiosos na cadeia produtiva. Esta abordagem vai além da simples reciclagem, incorporando estratégias que visam a reutilização, reparação e remanufatura dos componentes, valorizando cada estágio do ciclo de vida das baterias. Esse conceito, baseado em diferentes etapas, exige não apenas avanços tecnológicos na reciclagem, mas também a implementação de políticas públicas e estruturas regulatórias que incentivem e promovam a transição para uma economia mais circular e sustentável.

A reutilização dos módulos de baterias de veículos elétricos em outras aplicações representa um aspecto crucial da Economia Circular. Essa prática não apenas estende a vida útil dos módulos, mas também otimiza o aproveitamento dos recursos. Um exemplo promissor é a integração desses módulos em sistemas de armazenamento de energia para geradores fotovoltaicos. Esses módulos, mesmo após atingirem níveis específicos de degradação para uso veicular, muitas vezes retêm capacidade suficiente para desempenhar funções vitais em sistemas estacionários de energia. Ao serem integrados a esses sistemas, contribuem para a estabilidade e eficiência do armazenamento de energia renovável, promovendo a autonomia e a confiabilidade dos geradores fotovoltaicos, ao mesmo tempo em que reduzem a necessidade de descarte precoce desses módulos (Tupinambá, 2022).

Além de prolongar a vida útil dos módulos de baterias, a reutilização em aplicações estacionárias, como sistemas de armazenamento de energia, representa uma estratégia inteligente para a gestão de recursos. Esse reaproveitamento não apenas reduz o volume de resíduos, mas também alivia a demanda por matérias-primas para a fabricação de novos módulos, alinhando-se com os princípios da sustentabilidade e da eficiência energética. Essa prática oferece uma solução de duplo benefício, aproveitando a capacidade residual das baterias para fins estacionários, enquanto contribui para a integração de fontes de energia renovável na matriz energética, impulsionando a transição para um modelo mais sustentável e resiliente de geração e armazenamento de energia (Tupinambá, 2022).

A segunda vida das baterias pode abordar a reutilização também em sistemas estacionários de armazenamento de energia como *backup* para redes elétricas, essas baterias podem desempenhar um papel vital na estabilização da distribuição de energia durante picos de demanda. Além disso, ao empregar essas baterias em veículos de menor exigência energética, como carros elétricos de baixa velocidade ou bicicletas elétricas, é possível prolongar ainda mais sua vida útil (Tupinambá, 2023).

No entanto, esse conceito enfrenta desafios. A garantia da segurança e confiabilidade dessas baterias recondicionadas é primordial para sua reintegração, especialmente quando empregadas em sistemas críticos de armazenamento de energia. O processo de reutilização e os custos associados à sua implementação são áreas de preocupação, demandando inovação técnica e econômica para garantir que essas práticas sejam eficazes e sustentáveis a longo prazo (Tupinambá, 2023).

A economia circular na reciclagem de baterias de veículos elétricos destaca a reutilização de materiais valiosos, como o lítio, cobalto e níquel, minimizando o descarte e reduzindo a dependência de novas matérias-primas. Incluindo ainda a segunda vida dessas baterias em outras aplicações. Este enfoque não apenas prolonga a vida útil dos materiais, mas também reduz os impactos ambientais da extração e produção.

2.4 Impactos Ambientais e Econômicos

A avaliação dos impactos ambientais e econômicos na reciclagem de baterias de veículos elétricos é necessária para compreender seus efeitos globais. Ao reduzir a demanda por novas matérias-primas, a reciclagem diminui a extração de recursos naturais, reduzindo impactos como a degradação do solo e da água. Essa análise considera os custos operacionais e os benefícios ambientais, sendo um ponto importante para viabilizar sistemas eficazes de reciclagem (GRANDA, 2022).

É importante compreender o ciclo de vida completo das baterias, desde a extração até o descarte, para uma avaliação abrangente dos impactos ambientais. Isso envolve estratégias para otimizar processos, como o uso eficiente de recursos, a minimização de emissões de carbono e a redução de resíduos ao longo desse ciclo (GRANDA, 2022).

A análise inclui também a identificação e mitigação de riscos, monitorando os impactos ambientais e os perigos à saúde humana associados a substâncias tóxicas presentes nas baterias. As estratégias de gestão de resíduos são fundamentais para garantir conformidade com regulamentações ambientais e de saúde, minimizando tais riscos (GRANDA, 2022).

3. Metodologia

A metodologia utilizada foi a pesquisa bibliográfica para compilar informações e dados de diferentes estudos sobre a reciclagem de baterias de veículos elétricos. Essa pesquisa foi combinada com análises quantitativas dos resultados dos estudos revisados para fornecer uma visão abrangente dos impactos ambientais e econômicos da reciclagem de baterias (CESÁRIO, 2020). Além de propor e descrever soluções de reciclagem inovadoras utilizadas e em desenvolvimento experimental.

Para o levantamento dos dados e informações foi realizado buscas por artigos que abordam os temas sobre veículos elétricos, produção e reciclagem de baterias de veículos elétricos e sobre impactos ambientais e econômicos relacionados a reciclagem das baterias.

A coleta de dados teve como critério a busca por artigos científicos e acadêmicos, trabalhos de conclusão, notícias, site de empresas empenhadas na reciclagem e matérias que possuem fontes confiáveis, todos disponibilizados de forma online, sem critério de língua.

Adicionalmente foi analisado os processos de reciclagem da empresa Li-Cycle, onde foi possível conhecer o processo inovador no qual é possível atingir até 95% de eficiência na reciclagem das baterias.

Optou-se por não limitar a data de publicação das pesquisas, porém os estudos utilizados e referenciados foram publicados a menos de 10 anos, isso devido a atualidade do tema.

Para finalizar, houve comparação entre os trabalhos pesquisados e análise das abordagens buscando similaridades para escolha das fontes e desenvolvimento deste artigo, no qual era apresentado dificuldades, problemas, dados, processos de reciclagem e soluções que satisfazem este trabalho. (CESÁRIO, 2020).

4. Análise de Processos Inovadores: Li-Cycle

Com a demanda por energia limpa e sustentável crescendo, a reciclagem de baterias de íon de lítio torna-se cada vez mais crucial para garantir um futuro ambientalmente responsável. Nesse contexto, a *Li-Cycle* emerge como uma empresa líder global em recuperação de recursos de baterias de íon de lítio. Fundada em 2016, a *Li-Cycle* estabeleceu-se rapidamente como uma parceira confiável para clientes e parceiros em todo o mundo, utilizando tecnologias inovadoras e sustentáveis, como o *Spoke & Hub Technologies™*, para fornecer soluções seguras e escaláveis de reciclagem de baterias de íon de lítio. Com múltiplas instalações operacionais em *Spokes* na América do Norte e Europa, e projetos ambiciosos em andamento, como o Rochester Hub nos EUA e o projeto em

Portovesme, Itália, a *Li-Cycle* está na vanguarda da transformação do setor de reciclagem de baterias, impulsionando o caminho em direção a um futuro de energia mais limpa e sustentável (Li-Cycle).

4.1 Tecnologias Spoke & Hub™ da Li-Cycle: Reciclagem Segura e Sustentável

Processo inovador, seguro, escalável e sustentável para recuperar materiais críticos de todos os tipos de baterias de íon de lítio. As Tecnologias Spoke & Hub desempenham um papel central nesse processo, operando em duas etapas (Li-Cycle).

Na primeira etapa, denominada Spokes, as baterias são trituradas de forma segura e eficiente, com o Spoke de terceira geração capaz de processar diretamente pacotes de bateria de veículos elétricos completos, sem a necessidade de descarga ou desmontagem. Isso resulta em mínimos resíduos sólidos e líquidos, zero combustão, zero descarga de águas residuais e emissões de ar relativamente baixas (Li-Cycle).



Figura 3 – Massa Negra (Li-Cycle)

Na segunda etapa, os Hubs realizam o processamento hidrometalúrgico da massa negra, conforme mostrado na figura 3, para produzir produtos finais de alta qualidade, como carbonato de lítio reciclado para uso na produção de baterias de íon de lítio ou em outras aplicações na economia. O Rochester Hub será pioneiro na América do Norte, enquanto o Portovesme Hub será uma das maiores fontes de produtos reciclados na Europa (Li-Cycle).

A massa negra, produzida pela Spoke, é uma mistura de materiais provenientes dos componentes das baterias, contendo lítio (Li), níquel (Ni), cobalto (Co), grafite (C), cobre (Cu) e alumínio (Al). Esses metais são recuperados durante o processamento das baterias de íon-lítio, principalmente a partir das folhas presentes nas próprias baterias. Além disso, a Spoke também produz metais de cobre e alumínio a partir desse processo, contribuindo para a recuperação desses materiais valiosos (Li-Cycle).

4.2 O Impacto da Li-Cycle na Recuperação de Materiais Críticos

Alcançar altas taxas de recuperação de materiais críticos é essencial para garantir a eficácia e sustentabilidade da reciclagem de baterias de íon-lítio. A Li-Cycle tem desempenhado um papel fundamental nesse processo, utilizando sua tecnologia inovadora e patenteada para recuperar uma ampla gama de materiais valiosos presentes nas baterias (Li-Cycle).

Através de seu processo Spoke & Hub, a Li-Cycle consegue alcançar taxas de recuperação de até 95%, retornando uma quantidade significativa de lítio, níquel, cobalto, grafite, cobre e alumínio para a cadeia de suprimentos. Esses materiais são então processados para produzir produtos de alta qualidade, incluindo carbonato de lítio de grau de bateria reciclado. Ao maximizar a recuperação de materiais críticos, a Li-Cycle está contribuindo para a redução da dependência de recursos naturais e para a promoção de uma economia circular mais sustentável (Li-Cycle).

4.3 O Papel das Tecnologias Spoke & Hub™ na Criação de uma Cadeia Fechada de Suprimentos de Baterias

As tecnologias Spoke & Hub™ desempenham um papel fundamental na criação de uma cadeia de suprimentos de baterias fechada e sustentável. O processo Spoke envolve a fragmentação segura e eficiente de uma variedade de baterias de íon-lítio, incluindo pacotes de baterias de veículos elétricos, sem a necessidade de descarga prévia ou desmontagem. Isso permite a reciclagem de baterias de forma mais abrangente e escalável, contribuindo para a maximização da recuperação de materiais críticos (Li-Cycle).

Por outro lado, o processo Hub concentra-se na transformação da "massa negra" resultante do processo Spoke em produtos finais de alta qualidade, prontos para reintegração na cadeia de suprimentos de baterias. Essa etapa envolve a hidrometalurgia para extrair lítio, níquel, cobalto e outros materiais valiosos, que são então refinados para atender aos padrões de qualidade exigidos pela indústria de baterias (Li-Cycle).

Em conjunto, as tecnologias Spoke & Hub™ permitem uma abordagem integrada e eficiente para a reciclagem de baterias de íon-lítio, fechando o ciclo de vida das baterias e reduzindo a dependência de recursos naturais. Isso não só contribui para a sustentabilidade ambiental, mas também promove uma economia circular na indústria de baterias, onde os materiais valiosos são recuperados e reintroduzidos na produção de novas baterias, criando assim uma cadeia de suprimentos fechada e sustentável (Li-Cycle).

4.4 Vantagens do Processo de Reciclagem da Li-Cycle

O processo de reciclagem da Li-Cycle oferece uma série de vantagens distintas que contribuem para sua eficiência e eficácia. Em primeiro lugar, sua abordagem inovadora e patenteada, por meio das tecnologias Spoke & Hub™, permite uma recuperação de materiais críticos de forma altamente eficiente, maximizando as taxas de recuperação de lítio, níquel, cobalto e outros metais valiosos presentes nas baterias de íon-lítio (Li-Cycle).

Além disso, a versatilidade do processo Spoke & Hub™ permite a reciclagem de uma ampla variedade de tipos e formas de baterias de íon-lítio, desde pacotes de baterias de veículos elétricos até baterias de dispositivos portáteis. Isso garante que o processo possa lidar com diferentes tipos de resíduos de bateria, adaptando-se às necessidades variadas da indústria e do mercado (Li-Cycle).

Outra vantagem significativa reside na qualidade dos produtos finais obtidos por meio do processo de reciclagem da Li-Cycle. Ao transformar a "massa negra" resultante da fragmentação das baterias em produtos refinados e de alta qualidade, como lítio, níquel e cobalto, a Li-Cycle garante que esses materiais possam ser reintegrados de forma eficaz na cadeia de suprimentos de baterias, atendendo aos rigorosos padrões da indústria (Li-Cycle).

Em última análise, essas vantagens combinadas contribuem para promover a sustentabilidade ambiental e econômica, ao mesmo tempo que reduzem a dependência de recursos naturais e minimizam o desperdício de resíduos de baterias de íon-lítio.

O processo de reciclagem da Li-Cycle destaca-se como uma solução eficaz e abrangente para os desafios associados à gestão de resíduos de baterias, oferecendo eficiência, versatilidade e qualidade nos produtos finais recuperados (Li-Cycle).

4.5 Processo de Reciclagem da Li-Cycle

Na figura 4, a bateria de veículo elétrico é transportada por uma esteira. Esta etapa é fundamental em operações de reciclagem ou descarte adequado de baterias, onde a bateria é movida por uma esteira transportadora para a próxima fase do processo (Li-Cycle). Este transporte eficiente garante a transição da bateria para as etapas subsequentes, permitindo uma manipulação segura nesta etapa do processo de reciclagem. Além disso, esse método de transporte permite o controle do fluxo de baterias, garantindo uma operação contínua e eficiente.



Figura 4 – Bateria de veículo elétrico sobe pela esteira (Li-Cycle)

A figura 5 mostra o funil contendo um líquido especial e um triturador submerso na parte inferior, utilizado para processar materiais específicos (Li-Cycle).



Figura 5 – Funil com líquido proprietário e triturador submerso (Li-Cycle).

Durante o processo, os plásticos presentes no líquido são filtrados e separados. Mecanismos de vibração são empregados para separar os plásticos flutuantes do restante do

líquido, conforme mostra a figura 6. Essa etapa é crucial para a recuperação e reciclagem eficiente dos plásticos (Li-Cycle).



Figura 6 – Separação dos plásticos (Li-Cycle).

Após a separação dos materiais no funil, eles são direcionados e depositados diretamente em sacos (figura 7). Esta etapa facilita o armazenamento e transporte dos materiais para processamento adicional ou para distribuição (Li-Cycle).



Figura 7 – Separação do plástico em embalagem (Li-Cycle).

Após a trituração da bateria, os flocos de metais depositados no fundo do tanque são removidos do líquido. Este processo, figura 8, é crucial para a recuperação de materiais valiosos, como alumínio, aço, cobre e até mesmo metais preciosos, como ouro, platina e paládio, que podem estar presentes em placas de circuito (Li-Cycle).



Figura 8 - Recuperação de metais após trituração da bateria (Li-Cycle)

Um filtro prensa, figura 9, é utilizado para extrair a massa negra presente no líquido proveniente do triturador. Esta etapa é essencial para separar os materiais desejados do líquido, obtendo-se a massa negra (Li-Cycle).



Figura 9 – Filtro prensa (Li-Cycle).

A massa negra extraída no filtro prensa, conforme figura 10, consiste em uma mistura de materiais valiosos, incluindo lítio, níquel, cobalto e outros metais recuperados durante o processo (Li-Cycle).



Figura 10 - Massa negra no filtro prensa (Li-Cycle)

Após o processo de separação e tratamento, diferentes produtos finais são obtidos, cada um com sua própria utilidade e destino:

O plástico mostrado na figura 11 é considerado um produto final e pode ser encaminhado para instalações de reciclagem, onde será processado e utilizado na fabricação de novos produtos plásticos ou outros materiais (Li-Cycle).



Figura 11 – Produto final separado: plástico (Li-Cycle)

Os retalhos de metais mostrados na figura 12, que podem incluir alumínio, aço, cobre e possíveis metais preciosos recuperados da bateria, são produtos finais valiosos que podem ser vendidos para fundições ou indústrias de reciclagem de metais (Li-Cycle).



Figura 12 - Produto final separado: retalhos de metais (Li-Cycle).

A massa negra, conforme figura 13, é o resultado do processo de filtragem e é tratada como produto final, onde é encontrado o cobalto, lítio e níquel (Li-Cycle).



Figura 13 - Produto final separado: massa negra (Li-Cycle).

É de grande evidência a importância de abordar não apenas os aspectos técnicos, mas também os impactos ambientais e econômicos da prática do ciclo de vida de baterias de lítio de veículos elétricos. Importante explorar os diversos aspectos, desde a análise dos impactos ambientais e econômicos até a descrição detalhada do processo prático de reciclagem.

Empresas como a Li-Cycle destacam-se no cenário global, desenvolvendo tecnologias inovadoras como o Spoke & Hub™ para alcançar altas taxas de recuperação de materiais. Além disso, é importante discutir o papel da economia circular na redução de resíduos e na otimização de recursos, promovendo a reutilização de materiais descartados para diversas aplicações. Esses esforços não apenas contribuem para a conservação de recursos naturais, mas também impulsionam a transição para uma economia mais sustentável. Ao considerar todas essas perspectivas, é evidente que a reciclagem de baterias de íon-lítio é uma peça fundamental para construir um futuro mais limpo e resiliente, onde a inovação e a responsabilidade ambiental caminham lado a lado.

5. Considerações Finais

Com os objetivos estabelecidos no início deste estudo, é crucial ressaltar a abrangência das investigações realizadas, que englobam desde a análise do processo de reciclagem de baterias de íon-lítio até a avaliação das tecnologias e estratégias utilizadas por diversas empresas, como a Li-Cycle, para promover a sustentabilidade na gestão de resíduos eletrônicos. Nesse sentido, a pesquisa visa não apenas compreender os aspectos técnicos e ambientais da reciclagem de baterias, mas também fornecer visões para o desenvolvimento de estratégias voltadas para a economia circular.

Além disso, ao relembrar esses objetivos, destaca-se a importância de se explorar as implicações econômicas e sociais da reciclagem de baterias de íon-lítio, considerando as diversas variáveis envolvidas, como os custos de produção, os impactos da regulação ambiental e as oportunidades de inovação tecnológica. Ao abordar temas como a recuperação de materiais críticos, a criação de cadeias de suprimentos fechadas e a maximização da eficiência na gestão de resíduos, este estudo busca contribuir para a construção de um futuro mais sustentável e resiliente para as indústrias de energia.

Ao realizar uma síntese dos resultados deste estudo, é possível destacar diversas descobertas que contribuem para o entendimento da reciclagem de baterias

de íon-lítio e seu impacto ambiental e econômico. Entre os principais achados, destaca-se a eficácia e a viabilidade dos processos de reciclagem implementados por empresas como a Li-Cycle, que demonstraram ser capazes de recuperar uma ampla gama de materiais críticos, como lítio (Li), níquel (Ni) e cobalto (Co), de forma segura e sustentável. Além disso, observou-se que a implementação de tecnologias inovadoras, como as Spoke & Hub Technologies™, desempenha um papel fundamental na criação de cadeias de suprimentos fechadas e na maximização da eficiência na gestão de resíduos.

Além disso, os resultados ressaltam a necessidade de uma abordagem integrada para lidar com os desafios relacionados à gestão de resíduos eletrônicos e à transição para uma matriz energética mais limpa e renovável.

Os resultados obtidos ao longo deste estudo fornecem uma resposta clara às hipóteses inicialmente propostas, demonstrando a eficácia e a viabilidade da reciclagem de baterias de íon-lítio para a criação de uma economia circular e sustentável. As hipóteses levantadas em relação à capacidade das tecnologias de reciclagem, como as Spoke & Hub Technologies™, de recuperar materiais críticos, foram confirmadas pelos resultados observados, evidenciando a importância desses processos para a gestão responsável de resíduos eletrônicos e a preservação de recursos naturais.

As contribuições desta pesquisa são significativas para o campo de estudo da reciclagem de baterias de íon-lítio e para a gestão de resíduos eletrônicos de forma mais ampla. Ao demonstrar a eficácia das tecnologias de reciclagem, para recuperar materiais e promover a economia circular, este estudo destaca o potencial transformador desses processos na transição para uma sociedade mais sustentável.

Embora este estudo ofereça dados importantes sobre a reciclagem de baterias de íon-lítio, é importante reconhecer suas limitações. Por exemplo, a análise pode ser restrita por dados disponíveis ou pela falta de dados específicos sobre certos aspectos do processo de reciclagem. Além disso, a generalização dos resultados pode ser limitada pela especificidade das tecnologias e práticas de reciclagem abordadas neste estudo. Portanto, estudos futuros podem se concentrar ainda mais em abordagens mais abrangentes, incluindo diferentes tecnologias de reciclagem e suas implicações em diferentes contextos regionais ou setoriais.

Este estudo destaca a significativa contribuição da reciclagem de baterias de íon-lítio para a sustentabilidade ambiental e a economia global. Ao longo da análise,

ficou evidente que a reciclagem dessas baterias não apenas reduz os impactos ambientais negativos associados à extração de matérias-primas, mas também contribui para a conservação de recursos naturais e a mitigação da poluição.

Além disso, a reciclagem de baterias de íon-lítio oferece oportunidades econômicas, promovendo a criação de empregos, o desenvolvimento de tecnologias inovadoras e a expansão de mercados de reciclagem.

Em última análise, este estudo ressalta a importância contínua da pesquisa e desenvolvimento no campo da reciclagem de baterias, visando aprimorar os processos existentes e desenvolver soluções mais eficazes para enfrentar os desafios ambientais e econômicos associados à crescente demanda por tecnologias de armazenamento de energia.

Reitera-se a importância dos resultados obtidos neste estudo, destacando seu impacto no avanço do conhecimento sobre a reciclagem de baterias de íon-lítio. Sugere-se que pesquisas futuras explorem ainda mais os métodos de reciclagem e as tecnologias emergentes para otimizar o processo de reciclagem, visando alcançar maior eficiência, redução de custos e minimização de impactos ambientais. Além disso, investigações sobre novas aplicações para os materiais recuperados das baterias recicladas podem abrir caminho para soluções inovadoras e sustentáveis no campo do armazenamento de energia.

Referências

GRANDA, Alana: Destino errado de bateria de carro elétrico põe em risco meio ambiente. In.: **Agência Brasil**. 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 12 de out. de 2023.

RENAULT. In.: **Kwid E-Tech 100% elétrico**. Disponível em: <https://www.renault.com.br/veiculos-eletricos/kwid-etech.html>. Acesso em 12 de out. de 2023.

TUPINAMBÁ ENERGIA. In.: **Reciclagem de Bateria de Carro elétrico**. Disponível em: <https://tupinambaenergia.com.br/reciclagem-bateria-carro-eletrico/>. Acesso em 12 de out. de 2023.

TUPINAMBÁ ENERGIA. In.: **Bateria de Carro Elétrico: o que são, tipos e como funcionam**. Disponível em: <https://tupinambaenergia.com.br/bateria-de-carro-eletrico/>. Acesso em 12 de out. de 2023.

CASTELVECCHI, Davide. In.: **Electric cars and batteries: how will the world produce enough?**. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/d41586-021-02222-1> Acesso em 11 de nov. de 2023.

URIAS, Patrícia Moisés. In.: **Processos de Recuperação de Cobalto e de Lítio de Baterias de Íons de Lítio**. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/26167> Acesso em 11 de nov. de 2023.

MARTINS, Livia Salles. In.: **Reciclagem de baterias de veículos elétricos: Obtenção dos metais a partir de um processo hidrometalúrgico utilizando ácidos orgânicos**. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-05072023-102835/publico/LiviaSallesMartinsCorr22.pdf> Acesso em 11 de nov. de 2023.

SKEETE, Jean-Paul; WELLS, Peter; DONG, Xue; HEIDRICH, Oliver; HARPER, Gavin. In.: **Beyond the Event Horizon: Battery waste, recycling, and sustainability in the United Kingdom electric vehicle transition**. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629620301572#cebibl1> Acesso em 11 de nov. de 2023

BATREC. In.: **Battery recycling**. Disponível em: <https://batrec.ch/en/battery-recycling/portable-and-consumer-batteries/> Acesso em 25 de nov. de 2023.

REIS, Ricardo. In.: **UMA INTRODUÇÃO AO CPVC PARA HIDROMETALURGIA**. Disponível em: <https://www.corzan.com/blog-pt/uma-introducao-ao-cpvc-para-hidrometalurgia> Acesso em 27 de nov. de 2023.

CESÁRIO, Jonas Magno Dos Santos. In.: **METODOLOGIA CIENTÍFICA: PRINCIPAIS TIPOS DE PESQUISAS E SUAS CARACTERÍSTICAS**. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/educacao/tipos-de-pesquisas> Acesso em 12 de nov. de 2023.

Li-Cycle. In.: **Lithium-ion Battery Recycling - Li-ion Battery Resource Recovery | Li-Cycle**. Disponível em: <https://li-cycle.com/> Acesso em 31 de mar. de 2024.