



ConBRepro

XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



IA nas Engenharias

29 nov. a 01
de dezembro 2023

ANÁLISE DA GESTÃO DAS BATERIAS EM FIM DE VIDA DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS: UMA REVISÃO

Émerson Felipe Neves dos Santos

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Federal de Santa Catarina

Caroline Rodrigues Vaz

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Federal de Santa Catarina

Mauricio Uriona Maldonado

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Federal de Santa Catarina

Resumo: Os veículos elétricos são vistos como uma saída para solução de problemas graves de poluição do ar e mostrando ser uma tecnologia capaz de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis. Por isso, avaliar o desempenho da bateria e entender como se encontra seu estado de degradação, é necessário e pode contribuir para uma melhor eficiência no uso, nos limites do projeto e na vida útil. E, para que os veículos elétricos sejam, de fato, vistos como uma tecnologia chave para uma mobilidade mais sustentável, as baterias precisam ser uma solução mais sustentável, e serão se, toda sua cadeia de abastecimento e sua cadeia de valor agregada, forem sustentáveis no processo de circularidade. Neste cenário desafiador, práticas da economia circular para uma gestão de baterias em fim de vida podem contribuir para todo o processo sustentável. Este artigo tem como objetivo relatar uma breve revisão das principais definições de veículos elétricos, economia circular e práticas circulares de baterias de veículos elétricos em fim de vida.

Palavras-chave: veículos elétricos, economia circular, baterias em fim de vida.

ANALYSIS OF BATTERY MANAGEMENT AT THE END OF LIFE OF ELECTRIC VEHICLES: A REVIEW

Abstract: Electric vehicles are seen as a way to solve serious air pollution problems and are proving to be a technology capable of reducing dependence on fossil fuels. Therefore, evaluating battery performance and understanding its state of degradation is necessary and can contribute to better efficiency in use, within project limits and useful life. And, for electric vehicles to truly be seen as a key technology for more sustainable mobility, batteries need to be a more sustainable solution, and they will be if their entire supply chain and added value chain are sustainable. in the circularity process. In this challenging scenario, circular economy practices for managing end-of-life batteries can contribute to the entire sustainable process. This article aims to report a brief review of the main definitions of electric vehicles, circular economy and circular practices of end-of-life electric vehicle batteries.

Keywords: electric vehicles, circular economy, end-of-life batteries.

1. Introdução

A globalização e o crescimento financeiro incentivam a contribuição em menores restrições comerciais aumentando assim a intensidade e expansão do setor de transporte, porém as partes interessadas precisam de maiores esforços simultâneos para a transição ao transporte verde, pois 24% das emissões de gases de efeito estufa são gerados pelo setor de transporte, do qual o terrestre corresponde a 72% e ainda continua crescendo (CAO et al., 2021). Assim, os veículos elétricos estão, mais do que nunca, sendo vistos como uma saída para solução de problemas graves de poluição do ar e mostrando ser uma tecnologia capaz de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis (SADIQ JAJJA et al., 2021).

Eles são modelos inovadores ecologicamente corretos produzidos para diminuir a poluição oriunda dos automóveis convencionais, nesse aspecto, eles garantem benefícios ambientais, redução da dependência de petróleo e poluição da atmosfera para um transporte sustentável (SHANMUGAVEL; ALAGAPPAN; BALAKRISHNAN, 2022).

Todavia, com a frota de VEs aumentando no mercado, haverá a necessidade de identificar práticas adequadas do gerenciamento dos resíduos. Por isso, aplicar estratégias circulares é primordial para um sistema de recuperação de produtos em fim de vida (DEMARTINI, et al., 2023). O crescimento também levará a um grande número de baterias em fim de vida que serão descartadas após a redução de 20% de sua capacidade restante. Estima-se que até 2025 haja 3,4 milhões de baterias de VEs descartadas em fim de vida, totalizando 953 GWh de capacidade de bateria (THAKUR et al., 2022).

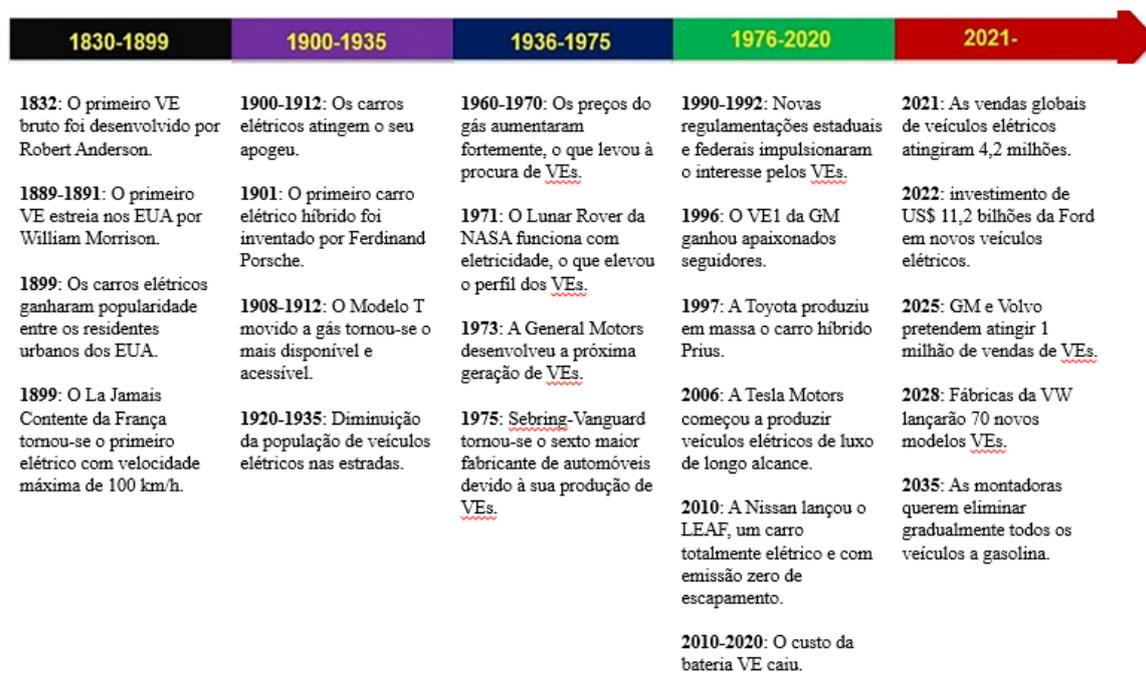
Portanto, de forma econômica, ecológica e social, a bateria, hoje, é o principal item dos VEs, e, somente com a utilização circular eficiente e funcional para as baterias e seus componentes, que a eletromobilidade possibilitará uma melhor transição a longo prazo para uma mobilidade mais sustentável (GLÖSER-CHAHOUD, et al., 2021). Este artigo tem como objetivo relatar uma breve revisão das principais definições de veículos elétricos, economia circular e práticas circulares de baterias de veículos elétricos em fim de vida.

2. Veículos elétricos

Com a degradação ambiental, cada vez mais, os VEs estão em desenvolvimento no mundo. Vários modelos de VEs estão em comercialização, sejam eles como veículos leves, ônibus, caminhões, motocicletas, entre outros. Dentre as classificações, existem os veículos elétricos híbridos (HEVs), os veículos elétricos híbridos plug-in (PHEVs), veículos elétricos de célula de combustível (FCEVs) e os veículos elétricos totalmente a bateria (BEVs).

Porém, o surgimento dos VEs tem mais de 100 anos de história. Em 1920, o mercado de veículos elétricos nos EUA tinha encorpado 28% dentro do mercado de transportes (AJANOVIC, 2015). Seu declínio se deu pela crescente produção massiva de veículos a gasolina com um custo médio de US\$ 650, enquanto o carro elétrico custava US\$ 1.750 e uma considerável redução no preço da gasolina, acompanhados pelo custo crescente das baterias, autonomia limitada dos VEs e longos tempos de carregamento, foram fundamentais para o declínio de mercado de VEs após 1920 (MATULKA, 2014). A figura 1 abaixo mostra a cronologia da tecnologia dos VEs.

Figura 1 – Cronologia da tecnologia dos VEs



Fonte: Adaptado de Mohanty et al. (2023)

E, apesar das estratégias para promoção de veículos elétricos variarem de país para país, a forma que melhor se aplica para a adoção antecipada é a de subsídio do governo, como descontos em compras, diminuição de impostos, doação em valor, pelo fato de que são os fatores que mais influenciam nas decisões de compra entre os clientes (LUO et al., 2022).

No entanto, é preciso que haja interesse entre todos os atores para que os novos fornecedores da cadeia de suprimentos de VEs possam conquistar espaço no mercado, pois os fatores que influenciam em uma mudança tecnológica desta dimensão, além dos políticos ou demanda de mercado são, os interesses de grandes corporações, as trajetórias tecnológicas, estratégias geopolíticas nacionais, os problemas de mobilidade urbana e à redução de emissão de gases do efeito estufa (WOLFFENBÜTTEL, 2022).

Na seção seguinte, aborda-se especificamente sobre as baterias de VEs.

2.1 Baterias de veículos elétricos

A história as baterias e dos carros elétricos estão inteiramente ligadas, com os primeiros veículos elétricos leves experimentais surgindo nos EUA, Reino Unido e Países Baixos, por volta de 1830. Em 1859, surgiram as primeiras baterias de chumbo-ácido, usada como bateria de arranque nos carros de motor a combustão e na maioria dos carros elétrico, e que, nestes anos também surgiram as baterias de ferro-zinco, por exemplo (HØYER, 2008).

Até o final dos anos de 1990, os VEs eram equipados principalmente com as baterias de chumbo-ácido, que ocasionava em uma vida útil e autonomia limitadas, mas no final da década o foco de pesquisa e desenvolvimento mudou para baterias de níquel metálico hidratado e de íons de lítio que tinha um custo elevado com pouca produção no mercado (DIJK, et al., 2013). A partir de 2010 o uso de baterias de níquel-hidreto e baterias de chumbo-ácido na eletromobilidade e armazenamento de energia sofreu maiores mudanças para o uso das baterias LIBs (LIU, 2021).

De acordo com o IEA (2020), as baterias de íon-lítio dominarão o mercado na década de 2020 pois, é uma tecnologia bem estabelecida e com bastante experiência para sua

fabricação em grande escala, com durabilidade de longo prazo, além dos grandes investimentos em produção e cadeias de abastecimento de íon-lítio, se tornando uma barreira para entrada de tecnologias alternativas que ainda estão em níveis mais baixos de tecnologia (TRLs, Technology Readiness Levels).

Outro fator a se analisar é o preço médio dos conjuntos de baterias de íon-lítio para VEs que vem em queda significativa, muito por fatores como, a maior oferta global, crescimento nos volumes dos pedidos das principais empresas automotivas, o aumento na densidade de energia, e a introdução de novas células e designs de baterias (LEMOS, 2022). Devido aos esforços significativos em planejamento e desenvolvimento, assim como as economias de escala, o preço do LIB caiu cerca de 97% desde sua entrada no cenário comercial no início da década de 1990 (BAJOLLE; LAGADIC; LOUVET, 2022).

De acordo com a BNEF (2022), depois de mais de uma década de quedas, os preços médios ponderados nos volumes de baterias LIB em todos os setores aumentara para 151 dólares/kWh em 2022, gerando um aumento de 7% em relação a 2021, isso ocorreu pelo aumento nos preços das matérias-primas e dos componentes das células.

No entanto, assim como os preços das baterias, a vida útil também tem grande importância, pois a degradação é inevitável durante a utilização, e gera o declínio de desempenho, perda de potência e vida útil (TANG, et al., 2023). Por exemplo, problemas como perda anormal de desempenho e previsão imprecisa do estado de saúde da bateria podem ocasionar em uso errado e fuga térmica dos LIBs, que poderá ocasionar em grandes acidentes de segurança (YU et al., 2023).

Por isso, avaliar o desempenho da bateria entendendo como se encontra seu estado de degradação, é necessário e pode contribuir para uma melhor eficiência no uso, nos limites do projeto e na vida útil da bateria (TANG, et al., 2023). Pois, o desenvolvimento de uma gestão adequada para os LIBs e fim de vida é fundamental para garantir a preservação dos recursos (CASTRO; CUTAIA; VACCARI, 2021). E a implementação de estratégias de economia circular, como na eficiência dos recursos, diminuição dos recursos utilizados, prolongando o ciclo de uso das matérias-primas, e facilitando os processos de reciclagem, é primordial para desenvolvimento sustentável das LIBs (PICATOSTE; JUSTEL; MENDOZA, 2022).

Na próxima seção, os temas relacionados a economia circular na gestão das baterias EOL serão abordadas.

3. Economia circular e baterias de veículos elétricos em fim de vida

Quando se refere a economia circular pode ser apresentada como um sistema regenerativo no qual a entrada e o desperdício de recursos, a emissão e o vazamento de energia são minimizados pela desaceleração, fechamento e estreitamento dos circuitos de material e energia. Isso pode ser alcançado por meio de projeto, manutenção, reparo, reutilização, remanufatura, recondição e reciclagem de longa duração (GEISSDOERFER et al., 2018). Pois, no ambiente atual, a economia circular é tida como estratégica e relevante para os resultados das empresas e geração de maiores valores (FONSECA et al., 2018), por reduzir os impactos ao meio ambiente e conflitos sociais, reutilizar insumos que não estão agregando valor ao sistema e para reciclar dejetos que poderiam ser eventualmente descartados.

E, para que os veículos elétricos sejam, de fato, vistos como uma tecnologia chave para uma mobilidade mais sustentável, as baterias precisam ser uma solução mais sustentável, e serão se, toda sua cadeia de abastecimento e sua cadeia de valor agregada, incluindo atores afiliados que lidam com as reciclagens, aplicações de segunda vida ou eliminação, forem sustentáveis, agregando partes a montante e a jusante no processo de circularidade (DA SILVA, et al., 2023). Que, Ramoni e Zhang (2013), destacaram a importância de inserir

atividades circulares para as baterias de VEs como uma forma de amortizar os custos da bateria além de sua primeira vida útil do veículo.

E, as estratégias relacionadas à economia circular têm como função principal desacelerar os ciclos de recursos, ou seja, segurar valor de um produto ou ampliar seu ciclo de vida (BOCKEN, et al., 2016). Dessa forma, estratégias podem reduzir os impactos ambientais de insumos de grande valor e com alta escassez (GEISSDOERFER, et al. 2017). A aplicação de diferentes práticas pode reduzir os custos dos produtos em até 30%, assim como incentivar o desenvolvimento sustentável (AHMED, et al., 2022).

Para isso, a promoção de práticas da economia circular para as baterias dos veículos elétricos em fim de vida exige um desenvolvimento e implementação de toda uma cadeia de abastecimento, juntamente com toda uma logística que conta com a coleta e triagem, recuperação e remanufaturamento de materiais, reutilização, upcycling, downcycling e o impulsionamento de novos mercados para materiais reciclados e de baterias remanufaturada (MALINAUSKAITE; ANGUILANO; RIVERA, 2021).

Na próxima seção serão discutidas algumas das práticas circulares para as baterias EOL.

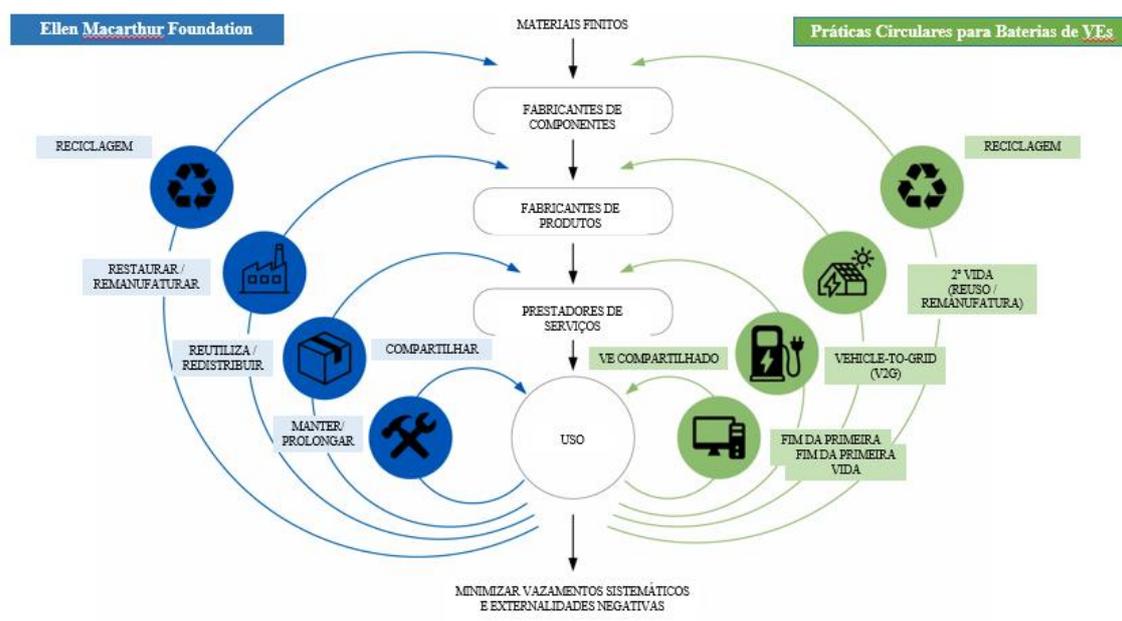
4 Práticas circulares de baterias de veículos elétrico em fim de vida

As práticas da economia circular são um modelo eficaz para o desenvolvimento das empresas, elas podem ofertar os recursos e capacidade suficiente para manutenção do desenvolvimento sustentável, como a recuperação, reutilização e reciclagem de recursos (CHEN, et al., 2023). E, quanto mais o quantitativo de baterias em fim de vida crescem, o desenvolvimento de tecnologias de reciclagem eficientes e a fidelização de práticas de econômica circular se tornarão imprescindíveis (GONZALEZ-SALAZAR; KORMAZOS; JIENWATCHARAMONGKHOL, 2023).

Então, as práticas de circularidade mais frequentes para a indústria automotiva são os 3Rs, reduzir, reutilizar e reciclar (Aguilar Esteva, et al., 2020; Czerwinski, 2021). A reciclagem e a reutilização de LIBs (em segunda vida) possibilitará reduzir os impactos ambientais do ciclo de vida em relação aos LIBs e todos os produtos dependentes, principalmente os automóveis, necessariamente os que são relacionados com as extração e produção de matérias-primas e os próprios LIBs, que são os maiores causadores para os impactos ambientais, demanda de energia primárias e esgotamento de metais, uma vez que a reciclagem e a reutilização evitarão utilizar materiais virgens (MALINAUSKAITE; ANGUILANO; RIVERA, 2021).

O diagrama de borboleta para VE mostrado na figura abaixo, revisa práticas circulares existentes que podem ser usadas para maximizar o uso das baterias EOL e aborda também os diferentes ciclos técnicos que busca manter os materiais, componentes e produtos sempre com maior valor agregado (ETXANDI-SANTOLAYA, et al., 2023). O tamanho dos círculos representa o uso extra de recursos que a implementação de cada ação ocasiona

Figura 2 – Diagrama de borboleta para baterias de VE



Fonte: Adaptado da Etxandi-Santolaya, et al. (2023)

A figura 5 mostra quatro diferentes ciclos voltados para os VEs, que correspondem a reciclagem, aplicação em segunda vida (reuso/remanufatura), V2G e fim da primeira vida, que possibilitam novos e circulares processos para as baterias EOL (ETXANDI-SANTOLAYA, et al., 2023).

4.1 Reciclagem

Uma das principais abordagens para a economia circular e que é primordial para as baterias é o processo de reciclagem. Tendo em vista que, em um cenário em que os recursos naturais estão se esgotando, a reciclagem de baterias de íons de lítio se apresenta como uma solução crucial, isso ocorre porque a reciclagem de LiBs tem o potencial de diminuir os danos ambientais causados por esses resíduos e criar novas fontes de suprimento para a esfera tecnológica, ou seja, transformar recursos em reservas tangíveis (AANNIR, et al., 2023).

Que até agora, a maioria das baterias EOL tem sido descartada em aterros sanitários, o que resulta na liberação de substâncias tóxicas e prejudiciais ao meio ambiente, e somente, menos de 5% delas estão atualmente passando por processos de reciclagem (FAN, et al., 2023). Mas, que, conforme estipulado na Diretiva de Baterias da União Europeia, há uma expectativa de que a eficiência na reciclagem de baterias de íons de lítio (LIB) aumente para 65% até 2025, em comparação com os 50% registrados em 2006 (KASTANAKI; GIANNIS, 2023). A escolha de reciclar as baterias encerra o ciclo dos materiais, uma vez que permite a recuperação de metais preciosos, como o níquel e o cobalto, que desempenham um papel econômico fundamental na reciclagem de baterias de íons de lítio (KASTANAKI; GIANNIS, 2023).

Nesse contexto, a reciclagem se revela como uma estratégia viável que oferece a oportunidade não apenas de ampliar o acesso a matérias-primas e reduzir a instabilidade nos preços, mas também de abordar preocupações ambientais decorrentes do descarte inadequado de resíduos (MAYYAS, et al., 2019). O correto processo de reciclagem de baterias de energia pode efetivamente diminuir o gasto de energia, reduzir as emissões de gases causadores do efeito estufa e combater a poluição ambiental, ao mesmo tempo em que diminui a necessidade de recursos minerais primários (LI, et al., 2023).

O impacto ambiental da reciclagem de baterias depende da composição química da bateria e do método utilizado, que contêm elementos valiosos, como níquel, cobalto e cobre, que podem ser recuperados eficazmente por meio de processos de reciclagem (CHEN, et al., 2023). Quanto aos procedimentos de reciclagem, atualmente, na indústria e na pesquisa acadêmica, os métodos hidrometalúrgicos, pirometalúrgicos e de reciclagem direta são os mais amplamente empregados e estudados. (CHEN, et al., 2019). Tais procedimentos apresentam a capacidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) em diferentes graus, especificamente, a reconstrução usando pirometalurgia resulta em uma diminuição de 2,85% nas emissões de GEE, enquanto a hidrometalurgia reduz essas emissões em 10,24%, e a reciclagem direta proporciona a maior redução, chegando a 34,52%. (YU, et al., 2021). Isso não só reduz os impactos ambientais, mas também as emissões de gases de efeito estufa associadas à extração e ao processamento de matérias-primas (CHEN, et al., 2023). Antes do procedimento de reciclagem, pode ser reutilizado um material, que consiste em dar uma segunda vida à bateria.

4.2 Aplicação em segunda vida (reuso/remanufatura)

A reutilização de baterias de íons de lítio (LIB) oferece a oportunidade de prolongar sua utilidade, o que pode contribuir para retardar o esgotamento de recursos, permitindo que as baterias tenham uma vida mais longa antes de serem finalmente recicladas para recuperar os materiais valiosos, concluindo assim o ciclo de forma sustentável (EMILSSON; DAHLLÖF, 2019).

Acredita-se que essa deterioração ocorra após um período de 5 a 8 anos de uso, o que equivale a cerca de 100.000 milhas (160.000 km) de viagem (HARAM, et al., 2021). No entanto, caso sejam reaproveitadas para outros usos, como em sistemas residenciais ou para gerenciar variações na geração de energia em usinas fotovoltaicas em grande escala, é possível estimar uma vida útil adicional de 7 a 10 anos antes de chegarem ao final de sua capacidade operacional (HARAM, et al., 2021).

Para a extensão da durabilidade da bateria pode ser alcançada de duas maneiras: primeiro, por meio da remanufatura, caso a bateria mantenha uma condição de saúde, segundo, pela sua reutilização, o que prolonga sua vida antes de ser reciclada para recuperar materiais secundários (CASTRO; CUTAIA; VACCARI, 2021). Além disso, estender a vida útil dos produtos por meio de remanufatura e/ou reutilização promove uma economia mais circular, reduzindo o desperdício e otimizando a gestão dos recursos (BOBBA; MATHIEUX; BLENGINI, et al., 2019).

Segundo Kastanaki e Giannis (2023), potenciais usos em segunda vida englobam a utilização de baterias em sistemas de armazenamento de energia para apoiar a geração de eletricidade a partir de fontes renováveis, armazenamento residencial ou outras aplicações em micro ou veículos de mobilidade urbana (como iluminação pública, veículos refrigerados, empilhadeiras, etc.), tornando-se uma atividade vantajosa, pois adia o processo de reciclagem.

Já Di Rienzo et al. (2023) mostra que as aplicações estacionárias são mais promissoras, onde as baterias utilizadas para suavizar sobrecargas na rede elétrica e compensar a produção intermitente de fontes de energia renovável, as aplicações estacionárias, geralmente, requerem baterias com alta capacidade energética, mas com menos exigências no que diz respeito a sua potência, elas são carregadas e descarregadas uma vez por dia com taxas de correntes bastante reduzidas. Seja qual for a utilização de baterias em segunda vida, elas geram um impacto ambiental positivo e contribuem para a redução associada a pegada de carbono. A utilização secundária de baterias de veículos elétricos pode desempenhar um papel fundamental na diminuição das emissões de dióxido de carbono (CO₂), com uma possível redução de até 56% quando comparada ao uso de gás

natural como combustível, especialmente em momentos de alta demanda de energia (AHMADI, et al. 2014).

De acordo com a figura 2, assim com a reciclagem, o reuso/remanufatura implicam em ciclos de recursos mais elevados e isso gera maiores impactos ambientais. Portanto, uma outra alternativa para aplicações em segunda vida é o V2G (veículo para rede), que possibilita estender o uso das baterias com o fornecimento de serviços em redes.

4.3 V2G (Vehicle-to-grid)

Integrar os veículos na rede é uma maneira inovadora de aproveitar as baterias de veículos elétricos. É possível otimizar a diminuição das emissões ao fazer uso de sistemas de carregamento inteligente que sincronizem o carregamento dos veículos com os momentos em que a produção de energia a partir de fontes renováveis está em seu ápice, além disso, durante os momentos em que há alta demanda por energia, os veículos podem, potencialmente, fornecer energia de volta à rede elétrica por meio da tecnologia Veículo-para-Rede (V2G) (PHILIP; WHITEHEAD; PRATO, 2023).

Os métodos de Veículo-para-Rede (V2G) podem ser divididos em duas categorias principais: estratégias de natureza econômica e aquelas de natureza técnica (SUFYAN, et al. 2020). As estratégias econômicas têm como foco principal a maximização dos lucros para os proprietários de veículos elétricos (VE), levando em conta fatores como a degradação da bateria, a disponibilidade do usuário e as tarifas de tempo de uso, enquanto isso, as estratégias técnicas visam apoiar o sistema elétrico na manutenção da estabilidade da tensão e da frequência (SUFYAN, et al. 2020).

O V2G oferece um grande potencial pois contribui para a utilização da bateria em dez vezes mais eficiente e satisfaz a procura de eletricidade, fazendo o VE operar tanto no modo de carga quanto no de descarga e utiliza a energia independentemente do tempo e das condições atmosféricas em comparação com outras fontes de energia, com sua utilização de eletricidade em qualquer lugar e não apenas onde está armazenada (KAUR; SINGH, 2022).

Todas as práticas circulares vista até agora, a partir da figura 5, mostram perspectivas de novos ciclos para prolongar a utilização da bateria, mas uma forma mais simples de utilizar as baterias de VE é o prolongamento de sua primeira vida útil no máximo possível.

4.4 Fim da primeira vida

Para que haja meios para prolongar a primeira vida útil da bateria, para Ramu e Thangavel (2023), a abordagem mais simples é deixar a bateria confiável a partir de melhorias em seus materiais de eletrodo positivo, negativo e eletrólitos, e mantendo as baterias sob parâmetros normais (como temperatura, corrente, estado de carga, profundidade de descarga) de operação, pois as condições de operação estão relacionadas ao processo de envelhecimento das baterias. Pode ser uma estratégia satisfatória para o prolongamento do ciclo de vida das baterias (RAMU; THANGAVEL, 2023).

Já Zhang e Tong (2022), projetaram um sistema de controle que coordena a velocidade do veículo com a temperatura interna da cabine, além disso, eles implementaram um controle do sistema de ar-condicionado que se baseia na frenagem regenerativa, esse conjunto de medidas resultou em uma diminuição de 3,38% no consumo de energia e em uma redução de 29,15% no desgaste da bateria. Ao aprimorar tanto a estratégia de gerenciamento de energia quanto o controle de temperatura da cabine em um sistema de trem de força híbrido, Widmer et al. (2022), identificou que é possível prolongar a vida útil da bateria em um intervalo de 5% a 15% sem aumentar o consumo total de energia.

Li et al. (2023), mostrou a ideia da internet das baterias como uma solução para o prolongamento da vida útil e uma melhor confiabilidade, pois é um sistema em rede com

princípios da Internet das Coisas para buscar dados das baterias dos VEs, com um monitoramento contínuo da integridade da bateria, o que permite a detecção antecipada de padrões de degradação e prováveis erros da bateria.

Os critérios de EOL em 70-80% de sua vida útil, atualmente determinada para todos os casos, precisam ser revistos e definidos, especificamente para cada VE, garantido que a bateria seja utilizada durante o máximo de tempo possível, desde que cumpra os requisitos funcionais e de segurança, através de um melhor indicador de usabilidade ao relacionar o estado atual da bateria com os requisitos funcionais (ETXANDI-SANTOLAYA, et al., 2023).

5. Considerações finais

Cada vez mais os veículos elétricos têm sido utilizados por conta dos seus inúmeros benefícios energéticos e ambientais, mostrando que são uma alternativa importante em comparação com os veículos convencionais.

No entanto, estas baterias de veículos elétricos só são medidas sustentáveis e suficientes se toda sua cadeia de insumos e cadeia de valor alargada, com os atores filiados que contribuem com a reciclagem das baterias usadas, aplicações de segunda vida ou descarte forem, também, sustentáveis, resultando em um processo total de circularidade.

Neste cenário desafiador, teorias relacionadas às práticas da economia circular para uma gestão de baterias em fim de vida podem contribuir na transição verde, com a busca pela redução dos efeitos ambientais e a potencialização da eficiência dos recursos com estratégias para a sustentabilidade e avançar para uma economia líquida zero representada pelos veículos elétricos, com estratégias que têm como função fechar (ou desacelerar) os ciclos dos recursos, quer dizer, segurar o valor de um produto ou ampliar seu ciclo de vida.

Referências

AGUILAR ESTEVA, Laura C. et al. Circular economy framework for automobiles: Closing energy and material loops. **Journal of Industrial Ecology**, v. 25, n. 4, p. 877-889, 2021.

AHMADI, Leila et al. Environmental feasibility of re-use of electric vehicle batteries. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 6, p. 64-74, 2014.

AHMED, Aser Alaa et al. A comprehensive multi-level circular economy assessment framework. **Sustainable Production and Consumption**, v. 32, p. 700-717, 2022.

AJANOVIC, Amela. The future of electric vehicles: prospects and impediments. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment**, v. 4, n. 6, p. 521-536, 2015.

AANNIR, Marouane et al. Towards a closed loop recycling process of end-of-life lithium-ion batteries: Recovery of critical metals and electrochemical performance evaluation of a regenerated LiCoO₂. **Journal of Power Sources**, v. 580, p. 233341, 2023.

BNEF. **Lithium-ion Battery Pack Prices Rise for First Time to an Average of \$151/kWh**. Disponível em: <<https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-rise-for-first-time-to-an-average-of-151-kwh/>>. Acesso em: 9 set. 2023.

BOBBA, Silvia; MATHIEUX, Fabrice; BLENGINI, Gian Andrea. How will second-use of batteries affect stocks and flows in the EU? A model for traction Li-ion batteries. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 145, p. 279-291, 2019.

BOCKEN, Nancy MP et al. Product design and business model strategies for a circular economy. **Journal of industrial and production engineering**, v. 33, n. 5, p. 308-320,

2016.

CAO, Jidi; CHEN, Xin; QIU, Rui; HOU, Shuhua. Electric vehicle industry sustainable development with a stakeholder engagement system. **Technology in Society**, [S. l.], v. 67, p. 101771, 2021. DOI: 10.1016/J.TECHSOC.2021.101771.

CASTRO, Francine Duarte; CUTAIA, Laura; VACCARI, Mentore. End-of-life automotive lithium-ion batteries (LIBs) in Brazil: Prediction of flows and revenues by 2030. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 169, p. 105522, 2021.

CHEN, Mengyuan et al. Recycling end-of-life electric vehicle lithium-ion batteries. **Joule**, v. 3, n. 11, p. 2622-2646, 2019.

CHEN, Pengyu et al. What lies about circular economy practices and performance? Fresh insights from China. **Journal of Cleaner Production**, v. 416, p. 137893, 2023.

DA SILVA, Elias Ribeiro et al. Unleashing the circular economy in the electric vehicle battery supply chain: A case study on data sharing and blockchain potential. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 193, p. 106969, 2023.

DEMARTINI, Melissa et al. The transition to electric vehicles and a net zero economy: A model based on circular economy, stakeholder theory, and system thinking approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 410, p. 137031, 2023.

DI RIENZO, Roberto et al. A novel methodology to study and compare active energy-balance architectures with dynamic equalization for second-life battery applications. **Journal of Energy Storage**, v. 73, p. 108772, 2023.

DIJK, Marc; ORSATO, Renato J.; KEMP, René. The emergence of an electric mobility trajectory. **Energy policy**, v. 52, p. 135-145, 2013.

EMILSSON, Erik; DAHLLÖF, Lisbeth. Lithium-ion vehicle battery production-status 2019 on energy use, CO2 emissions, use of metals, products environmental footprint, and recycling. 2019.

ETXANDI-SANTOLAYA, Maite et al. Are electric vehicle batteries being underused? A review of current practices and sources of circularity. **Journal of environmental management**, v. 338, p. 117814, 2023.

FAN, Tao et al. Life cycle assessment of electric vehicles' lithium-ion batteries reused for energy storage. **Journal of Energy Storage**, v. 71, p. 108126, 2023.

FONSECA, Luis Miguel et al. Assessment of circular economy within Portuguese organizations. **Sustainability**, v. 10, n. 7, p. 2521, 2018.

GEISSDOERFER, Martin et al. The Circular Economy—A new sustainability paradigm?. **Journal of cleaner production**, v. 143, p. 757-768, 2017.

GEISSDOERFER, Martin et al. Business models and supply chains for the circular economy. **Journal of cleaner production**, v. 190, p. 712-721, 2018.

GLÖSER-CHAHOUD, Simon et al. Industrial disassembling as a key enabler of circular

economy solutions for obsolete electric vehicle battery systems. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 174, p. 105735, 2021.

GONZALEZ-SALAZAR, Miguel; KORMAZOS, Georgios; JIENWATCHARAMONGKHOL, Viroj. Assessing the economic and environmental impacts of battery leasing and selling models for electric vehicle fleets: A study on customer and company implications. **Journal of Cleaner Production**, v. 422, p. 138356, 2023.

HARAM, Mohammed Hussein Saleh Mohammed et al. Feasibility of utilising second life EV batteries: Applications, lifespan, economics, environmental impact, assessment, and challenges. **Alexandria Engineering Journal**, v. 60, n. 5, p. 4517-4536, 2021.

HØYER, Karl Georg. The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars. **Utilities Policy**, v. 16, n. 2, p. 63-71, 2008.

IEA, International Energy Agency. **Global EV Outlook**. Disponível em: <<https://www.iea.org/>>. Acesso: 11 set. 2023.

KAUR, Amrit Pal; SINGH, Mukesh. Design and development of a three-phase Net Meter for V2G enabled charging stations of electric vehicles. **Sustainable Energy, Grids and Networks**, v. 30, p. 100598, 2022.

LEMOS, Thiago Rodrigues et al. Eletromobilidade e baterias de íon-lítio: spillovers tecnológicos das TICs à indústria automotiva. 2022.

LI, Heng et al. IoB: Internet-of-Batteries for Electric Vehicles—Architectures, Opportunities, and Challenges. **Green Energy and Intelligent Transportation**, p. 100128, 2023.

LIU, Wenqiu et al. Dynamic material flow analysis of critical metals for lithium-ion battery system in China from 2000–2018. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 164, p. 105122, 2021.

LUO, Qi et al. Dynamic subsidies for synergistic development of charging infrastructure and electric vehicle adoption. **Transport Policy**, v. 129, p. 117-136, 2022.

MALINAUSKAITE, J.; ANGUILANO, L.; RIVERA, X. Schmidt. Circular waste management of electric vehicle batteries: Legal and technical perspectives from the EU and the UK post Brexit. **International Journal of Thermofluids**, v. 10, p. 100078, 2021.

MATULKA, Rebecca. The history of the electric car. **Energy. gov, Recuperado de: <http://energy.gov/articles/history-electric-car>**, 2014.

MAYYAS, Ahmad; STEWARD, Darlene; MANN, Margaret. The case for recycling: Overview and challenges in the material supply chain for automotive li-ion batteries. **Sustainable materials and technologies**, v. 19, p. e00087, 2019.

MOHANTY, Amar K. et al. Sustainable composites for lightweight and flame retardant parts for electric vehicles to boost climate benefits: A perspective. **Composites Part C: Open Access**, v. 12, p. 100380, 2023.

PHILIP, Thara; WHITEHEAD, Jake; PRATO, Carlo G. Adoption of electric vehicles in a laggard, car-dependent nation: Investigating the potential influence of V2G and broader

energy benefits on adoption. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 167, p. 103555, 2023.

PICATOSTE, Aitor; JUSTEL, Daniel; MENDOZA, Joan Manuel F. Circularity and life cycle environmental impact assessment of batteries for electric vehicles: Industrial challenges, best practices and research guidelines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 169, p. 112941, 2022.

RAMONI, Monsuru Olalekan; ZHANG, Hong-Chao. End-of-life (EOL) issues and options for electric vehicle batteries. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 15, p. 881-891, 2013.

RAMU, Pradeep; THANGAVEL, Venugopal. The effects of fast and normal charging, driving cycle, and a 24-hour regional climate on the performance of electric vehicle batteries. **Journal of Energy Storage**, v. 73, p. 108840, 2023.

SADIQ JAJJA, Muhammad Shakeel; HASSAN, Syed Zahoor; ASIF, Muhammad; SEARCY, Cory. Manufacturing value chain for battery electric vehicles in Pakistan: An assessment of capabilities and transition pathways. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 328, p. 129512, 2021. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.129512.

SHANMUGAVEL, Nagarajan; ALAGAPPAN, Chidambaram; BALAKRISHNAN, Janarthanan. Acceptance of electric vehicles: A dual-factor approach using social comparison theory and technology acceptance model. **Research in Transportation Business & Management**, [S. l.], p. 100842, 2022. DOI: 10.1016/J.RTBM.2022.100842.

SUFYAN, Muhammad et al. Charge coordination and battery lifecycle analysis of electric vehicles with V2G implementation. **Electric Power Systems Research**, v. 184, p. 106307, 2020.

TANG, Aihua et al. Health and lifespan prediction considering degradation patterns of lithium-ion batteries based on transferable attention neural network. **Energy**, p. 128137, 2023.

THAKUR, Jagruti; DE ALMEIDA, Constança Martins Leite; BASKAR, Ashish Guhan. Electric vehicle batteries for a circular economy: Second life batteries as residential stationary storage. **Journal of Cleaner Production**, v. 375, p. 134066, 2022.

WIDMER, Fabio et al. Battery lifetime extension through optimal design and control of traction and heating systems in hybrid drivetrains. **ETransportation**, v. 14, p. 100196, 2022.

WOLFFENBÜTTEL, Rodrigo Foresta. Políticas setoriais e inovação: entraves e incentivos ao automóvel elétrico no Brasil. **Revista Brasileira de Inovação**, v. 21, 2022.

YU, Meihan et al. Evaluating environmental impacts and economic performance of remanufacturing electric vehicle lithium-ion batteries. **Journal of Cleaner Production**, v. 321, p. 128935, 2021.

ZHANG, Yongzhi; TONG, Lang. Regenerative braking-based hierarchical model predictive cabin thermal management for battery life extension of autonomous electric vehicles. **Journal of Energy Storage**, v. 52, p. 104662, 2022.