

1. Introdução

Os atuais modelos de transporte adotados na logística urbana são passíveis de mudanças, principalmente devido aos impactos ambientais gerados pela queima de combustíveis fósseis, de modo que requerem alternativas de mudanças para redes ambientais mais eficientes (Lin et al., 2014).

Segundo Xing et al. (2016) uma grande quantidade de dióxido de carbono (CO₂), óxido nítrico (NO_x), metano (CH₄) e outros GEE são produzidos após a combustão do óleo diesel, o que resulta na deterioração do clima global e geram uma ameaça à sobrevivência humana e do meio ambiente.

As emissões de gases de efeito estufa (GEE) provenientes da queima de combustíveis pelo setor de transporte no Brasil representaram 46,3% do total das emissões pelos diversos setores produtivos no Brasil (BEN, 2019). Ainda, estimativas da CETESB (2018) apontam que 7% das emissões de GEE na região metropolitana de São Paulo (RMSP), provêm de veículos comerciais leves, caminhões leves, semi-leves e médios, em um ambiente com características de tráfego carregado, acionamento e paradas frequentes, baixa velocidade, além de uma frota circulante de aproximadamente 176.500 caminhões (Detran, 2019).

Portanto, uma das alternativas que pode contribuir para minimizar os impactos causados ao meio ambiente, devido as emissões de GEE, é a utilização de veículos elétricos para o chamado transporte de última milha, que corresponde ao trecho final que a mercadoria percorre no modo de transporte, normalmente feito pelo modo rodoviário, antes de chegar ao seu destino (Altoé, 2017; Milanez et al., 2017; Ranieri, 2018).

Entretanto, algumas pesquisas feitas ao redor do mundo sobre o uso de veículos elétricos (VE) empregados no transporte de mercadorias, seja em grandes centros urbanos ou em médias e longas distâncias, apresentam vantagens e desvantagens, nas esferas social, ambiental e econômica (Quak et al., 2016).

Neste sentido, foram desenvolvidos alguns trabalhos voltados ao ciclo de vida dos veículos elétricos, com base nos conceitos da Economia Circular (EC), em que foram avaliados os veículos elétricos como alternativa aos veículos convencionais movidos à combustão interna (Davis e Figliozzi, 2013; Juan et al., 2014).

Ainda neste aspecto, o balanço feito pelo órgão *Urban Freight Research Roadmap* (ERTRAC/ALICE, 2015), mostrou que o futuro do transporte urbano de cargas será influenciado pelo advento de novas tecnologias; todavia, determinadas tecnologias devem ser examinadas com maior precisão, devido aos altos investimentos necessários para sua implementação. Também, segundo Goes et al. (2018), são fundamentais os estudos que possibilitem um melhor conhecimento sobre as inovações na distribuição de mercadorias por meio da atividade de transportes, bem como as possíveis situações em que estas tecnologias possam ser aplicadas.

Nesse contexto, o uso de eletricidade para as necessidades de transporte oferece a oportunidade de substituir os combustíveis fósseis por fontes de “energias limpas”, pois a ligação entre o uso de transportes sustentáveis com energias renováveis poderá contribuir é significativamente para redução das emissões de GEE, assim como para minimizar a dependência da importação e exploração de petróleo (D’Adamo e Rosa, 2019).

Alguns estudos avaliaram a sustentabilidade de VEs em comparação com veículos convencionais que empregam motor de combustão interna e apontaram que os VEs são objetos de críticas por conta do seu peso maior, que está relacionado com as baterias e aos motores elétricos etc., além de alcance limitado e falta de infraestrutura de recarga para as baterias (Lave e Maclean, 2002; Graditi et al., 2015; Correa et al., 2017; Wang e Wu, 2017).

Entretanto, D'Adamo e Rosa (2019) mostram que os aspectos relacionados ao gerenciamento de VEs obsoletos em fim de vida foram avaliados quanto a desmontagem, reciclagem, remanufatura e sustentabilidade; além de que quando considerado apenas a reciclagem de VE, os três pilares da sustentabilidade também são explorados.

Neste sentido, alguns autores destacaram que baterias de íon Lítio (*lithium-ion batteries* – *LIBs*) reaproveitadas podem ser usadas em várias aplicações, na forma de uma segunda vida; por exemplo, em operações de serviços públicos, edifícios comerciais e residenciais, e que dependendo de suas características, em estudos e projetos de pesquisa e inovação, revelaram que as aplicações com mais frequência são aquelas para integração de fontes renováveis de energia na rede (Ademe, 2011; Canals, et al., 2015; Koch-Ciobotaru, et al., 2015).

Assim, nesse contexto, a presente pesquisa tem como objetivo avaliar as oportunidades e desafios para as *LIBs* em seu fim de vida, utilizadas por veículos elétricos em sistemas de transportes de cargas no Brasil, com base nos conceitos da EC.

2. Referencial teórico

2.1. Economia Circular (EC)

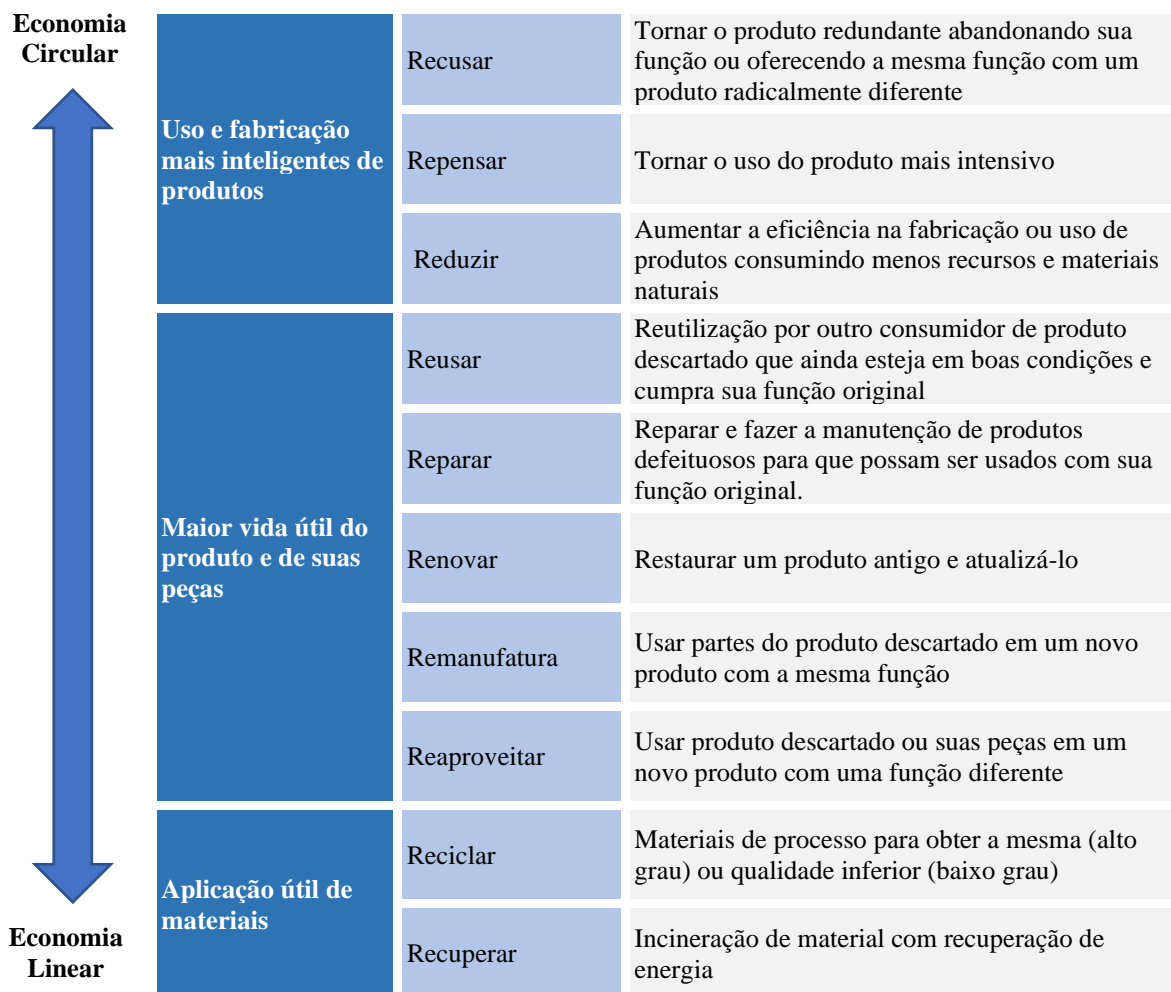
A EC é um conceito empregado pela União Europeia (EU) e por vários governos nacionais, bem como por empresas em todo o mundo (Dente e Tavasszy, 2018); de modo que se estima que transações com a EC possam representar ganhos anuais de 600 bilhões de Euros para o setor industrial da UE (Emaf, 2015), tendo se em vista que fornece uma estrutura para melhorar os atuais modelos de negócios, e ao mesmo tempo contribui para as questões que envolvem a recuperação e a integridade ambiental (Ghisellini et al., 2016).

Segundo Korhonen et al. (2018) o conceito de EC é abrangente e apresenta muitas definições, e vagamente baseado em uma coleção fragmentada de ideias derivadas de alguns campos da ciência, incluindo campos emergentes e conceitos científicos. Não obstante, Kirchherr e Piscicelli (2019) descreveram que os principais fundamentos da EC dizem respeito à redução, reutilização, reciclagem e recuperação de produtos em seu fim de vida. Ainda, de acordo com Van Buren et al. (2016) a EC pode ser definida como uma implementação que implica em reduzir o consumo de matérias-primas, promover o desmonte e reutilização de produtos após o uso, além de prolongar a vida útil por meio de manutenção, reparo e o uso de materiais e matérias-primas obtidos por meio de processos da reciclagem. De acordo com Geerken et al. (2019), o conceito de EC está ligado à diversas áreas, como por exemplo a ecologia industrial, economia ambiental e economia ecológica.

Ainda, Kirchherr e Piscicelli (2019) descrevem a EC como um sistema econômico baseado em modelos de negócios que substituem o conceito de 'fim de vida' por redução, reutilização, reciclagem e recuperação de materiais em processos de produção/distribuição e consumo, operando assim nos níveis micro, médio e macro com o objetivo de alcançar o desenvolvimento sustentável, que implica criar qualidade ambiental, prosperidade econômica e equidade social, em benefício das gerações atuais e futuras.

Potting et al., (2017) afirmam que existem várias estratégias de circularidade que podem reduzir o consumo de recursos naturais e minimizar a produção de resíduos que são ordenados por prioridade de acordo com seus níveis de circularidade. Os autores propõem um modelo, baseado em indicadores 3 indicadores para estratégia em 9R's, conforme apresentado na Figura 1. Nesta representação o componente R0 (Recusar) não está incluso na lógica dos conceitos dos 9Rs, por se tratar da ausência de produção de um produto, em função de novas possibilidades de uso.

Figura 1: Os 9R's da sustentabilidade



Fonte: Adaptado de Potting et al., (2017)

Neste sentido, Pagliaro e Meneguzo (2019), afirmaram que as *LIBs* são cada vez mais reutilizadas em sistemas estacionários de armazenamento de energia, e eventualmente recicladas para recuperar todos os seus componentes de maior valor econômico. Entretanto, Ahuja et al. (2020) consideram um grande desafio a economia circular para os VEs, porque a reciclagem de *LIBs* é um processo ainda em desenvolvimento, além de que os volumes são insuficientes para que a reciclagem seja atualmente lucrativa, e que uma EC terá de ser impulsionada por intervenção regulatória.

2.2. Avaliação do Ciclo de Vida

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é um método empregado para avaliar o impacto ambiental, bem como os recursos utilizados durante o ciclo de vida de um produto, que compreende desde a extração e beneficiamento das matérias-primas, o processo de produção, até a gestão dos resíduos gerados (ISO, 2006).

Segundo Tao et al. (2017) a ACV traz benefícios importantes para o *design* do produto, além de ajudar a determinar se uma nova solução é melhor para o meio ambiente, comparada às que já são disponíveis. De outro modo, Testa et al. (2016), afirmaram que para identificar

os maiores contribuintes de impactos ambientais em seus produtos e processos, as empresas podem empregar a ACV e depois instruir diretamente os contribuintes para reduzir os impactos negativos.

Souza et al. (2018) avaliaram o ciclo de vida para diferentes cenários de consumo de combustíveis e configurações de motorizações para um veículo. Foram analisados cinco cenários: 1- veículo convencional com motor de combustão interna movido a gasolina; 2- movido a etanol hidratado; 3- movido a uma mistura de gasolina e etanol hidratado (veículo flex); 4- veículo elétrico híbrido; 5 - veículo elétrico movido por bateria de tração. Como principal resultado, destacaram que os veículos elétricos movidos a bateria de tração (*Lithium-Ion Batteries – LIBs*) apresentaram os menores impactos ambientais de forma geral, seguido pelos veículos convencionais de combustão interna que utilizam etanol.

Em trabalho feito por Burke e Marshal (2009), mostrou que as etapas do ciclo de vida e incluídas na avaliação do desempenho ambiental das baterias de VE (*LIBs*) reaproveitadas para a segunda vida, devem ser claramente identificadas de acordo com o escopo do estudo e a aplicação em avaliação. Do mesmo modo, Canals et al. (2015) e Richa et al. (2015) destacaram que para avaliar como diferentes aplicações de reaproveitamento de baterias *LIBs* de VE afetam todo o ciclo de vida, é preciso considerar todas as fases do ciclo de vida dos VEs, desde a fabricação de automóveis, o uso da bateria no veículo, assim como o uso na segunda vida, após a etapa de reciclagem dos componentes.

Também, Ahmadi et al. (2014) avaliaram a viabilidade ambiental de reutilizar baterias de veículos elétricos (VE) em seu fim de vida, para aplicações estacionárias, por meio de um modelo de ciclo de vida parametrizado, em que pressupõe a vida útil de uma bateria VE de uma *LIB* seja estendida para incorporar o reaproveitamento e a reutilização no armazenamento da rede para uma aplicação de utilidade futura.

De outro modo, Faria et al. (2014) e Sathre et al. (2015) em seu estudo incluíram apenas os estágios diretamente relacionados ao segundo uso da bateria *LIB*; assim, em que foram considerados os impactos de energia do carregamento da bateria, na avaliação ambiental para o uso na segunda vida, desconsiderando os impactos dos estágios de fabricação.

Ainda, segundo Bobba et al. (2018) a avaliação do desempenho ambiental na segunda vida das *LIBs*, apresenta vários aspectos que devem ser considerados para fornecer uma avaliação completa e para permitir uma comparação do uso em diferentes aplicações, além de que reforçam a necessidade de melhorar a coleta de dados em todo o ciclo de vida e em cada estágio, com foco especialmente no estágio de uso.

3. Metodologia

A metodologia empregada consiste no levantamento de artigos científicos, feito nas bases de dados *Scopus* e *Sciencedirect*, que tratam de técnicas, procedimentos e avaliações da economia circular aplicada em baterias de íon lítio em seu fim de vida, e utilizadas em veículos elétricos empregados em sistemas de transporte de cargas.

Inicialmente, foi feita uma revisão referente à economia circular, identificando os objetivos e conceitos, seus componentes, os principais indicadores, além de suas aplicações. A revisão sobre a EC foi realizada para entender as principais áreas vinculadas ao uso das *LIBs*. Em seguida, foram identificados, os indicadores da EC, e posteriormente, usados para avaliar as oportunidades e desafios destes indicadores aplicados após o fim de vida das *LIBs*. Neste tópico foi utilizado o modelo proposto por Potting et al. (2017), que propõem 3 indicadores com estratégias nos 9R's da sustentabilidade que podem ser solicitados por prioridade de acordo aos seus níveis de circularidade e os benefícios que cada um deles pode trazer para os produtos.

A etapa seguinte consistiu em examinar as oportunidades e desafios que a literatura vigente apresenta para os parâmetros utilizados na EC, na forma de oportunidades e ameaças exibidas em cada um dos parâmetros selecionados, vinculando-os às técnicas e processos para as *LIBs* em seu fim de vida.

4. Resultados

Uma das principais questões relacionadas ao uso dos VEs é que eles são difíceis de reciclar, devido à sua maior complexidade, (Manzetti e Mariasiu, 2015; Qiao et al., 2017); e ainda a taxa de crescimento esperada para este mercado, que pode se tornar um risco potencial para o meio ambiente, tendo em vista os materiais críticos empregados na fabricação das baterias de tração *LIBs* (IEA, 2020).

Entretanto, a utilização adequada destes resíduos, pode ser capaz de gerar uma economia de milhões de dólares, bem como empregos para um país, por meio da reciclagem, remanufatura e reuso (Kala e Mishra, 2021). Segundo D'Adamo e Rosa (2019), resultados mostram que os especialistas têm dedicado muita atenção a este tópico, dados os materiais críticos e valiosos embutidos nas baterias de tração podem oferecer lucros potenciais e interessantes.

Os conceitos da EC podem ser uma boa alternativa para as *LIBs* em seu fim de vida, pois é possível aplicar alternativas sustentáveis no uso de materiais e recursos retirados delas quando se tornarem obsoletas para o tracionamento dos veículos. Se comparados com os atuais modelos, a EC pode reduzir as contínuas extrações de materiais utilizados na produção destas baterias, criando uma economia mais competitiva e verde (Hua, 2020).

Neste sentido, conhecer a viabilidade econômica das *LIBs* em seu fim de vida, por meio da EC, pode ser uma alternativa importante se for criado valor por meio da remanufatura, reaproveitamento e reciclagem, em que as principais técnicas conhecidas, se referem ao uso em sistemas estacionários, o reaproveitamento em aplicações que requerem menos consumo de energia e a reciclagem dos materiais que as compõem (Sabbaghi et al., 2015).

Outro aspecto importante das *LIBs*, é que no final do ciclo de vida elas possuem entre 60 e 90% da capacidade de armazenamento inicial de energia, e neste sentido, aquelas com capacidade de armazenamento acima de 80% da capacidade inicial de recarga, são ideais para remanufatura (Vacca, 2020; Wang et al., 2020).

Apesar de algumas pesquisas apontarem para os mesmos caminhos de reaproveitamento e remanufatura das *LIBs*, é perceptível a falta de uma estratégia única, pois o destino dos resíduos depende dos custos locais, interesses, capacidade e infraestrutura de cada país (Castro et al., 2021).

Além disso, o processo de reaproveitamento, também é conhecido como aplicação de segunda vida, sendo nessa etapa essencial diagnosticar a capacidade, segurança e condição estrutural da *LIB*, além de uma eficiência em torno de 80% da capacidade inicial.

Portanto, a reciclagem das *LIBs* pode substituir as matérias primas, utilizadas na produção, contribuindo com a preservação dos recursos naturais e reduzindo o impacto ambiental gerado na extração (Costa, et al., 2021). Enquadram-se nesta estratégia as baterias que possuem uma eficiência menor que 60% da capacidade inicial (Wang et al., 2020).

4.1. Oportunidade e desafios da EC para as LIBs em seu fim de vida.

O modelo de Potting et al. (2017), avalia a evolução de 3 indicadores de desempenho: uso e fabricação mais inteligentes de produtos; maior vida útil do produto e de suas peças; aplicação útil de materiais. Estes indicadores estão diretamente relacionados com a economia

linear e a economia Circular, por meio de estratégias como base nos 9R's da sustentabilidade: recusar, repensar, reduzir, reusar, reparar, renovar, remanufatura, reaproveitar, reciclar e recuperar.

Neste sentido estes indicadores foram utilizados, com objetivo de identificar possíveis oportunidades e desafios em cada uma destas recomendações. O próximo passo, foi identificar na literatura científica, técnicas para cada um dos R's da sustentabilidade, com foco na economia circular, e com o objetivo de distinguir se as recomendações podem representar uma oportunidade ou um desafio, para a EC aplicada as *LIBS* em seu fim de vida.

4.1.1. Fabricação e uso de produtos - Oportunidades e desafios de Recusar, Repensar e Reduzir

No que diz respeito a estratégia de “Recusa” do uso das *LIBs*, entende-se que este aspecto não se aplica as questões aqui abordadas, pois as *LIBs* correspondem ao resultado da recusa dos modelos de motores movidos a combustão interna, tendo vista que essa demanda vai ser impulsionada principalmente pela transição para o conceito de mobilidade elétrica, que visa substituir os veículos convencionais pelos VEs, com características de serem mais ecológicos (Costa et al., 2021).

Quanto as oportunidades relacionadas ao “Repensar”, em que as recomendações estão pautadas no uso mais intensivo do produto, novas oportunidades são identificadas, conforme sugere o trabalho de Castro et al. (2021). Os autores apontam que cerca de 8 milhões de VEs poderão estar circulando no Brasil em 2030, em que este número atende as metas estabelecidas por outros países ao redor do mundo, como a Alemanha com 7 à 10 milhões de VEs; 6 milhões na Itália; 2,7 milhões Canadá; 1,5 milhões no estado da Califórnia (EUA) e aproximadamente 600.000 VEs na Colombia (IEA, 2020); portanto, atendendo as expectativas destes indicadores.

Com relação aos desafios voltados à estratégia de “Repensar”, podem estar ligados a escassez dos materiais utilizados para a produção das *LIBs*, por exemplo, devido ao uso excessivo, de modo que neste sentido alguns estudos já apontam para os riscos de interrupção do fornecimento, devido à expansão global do mercado de VEs (Alves Dias et al. ,2018; Harvey, 2018).

Ainda, de acordo com Jones et al. (2020), a previsão para a demanda por lítio (Li) e Cobalto (Co) em 2030, aponta para aumento entre 18 e 37 vezes, respectivamente, em comparação com os níveis de 2015. Alves Dias et al. (2018) estimaram que a demanda global de Co atingirá cerca de 220.000 em 2025, e quase duplicando, atingindo 390.000 em 2030.

As oportunidades relacionadas a estratégia “Reduzir”, estão ligadas às recomendações para aumentar a eficiência na fabricação, ou uso de produtos, consumindo menos recursos e materiais naturais. No entanto, ainda não foram identificados estudos que mostram a eficiência no uso dos recursos, bem como na fabricação dos materiais utilizados nas *LIBs*.

Além disso, observa que os desafios neste indicador são grandes, pois há uma concordância entre alguns autores que as questões relacionadas ao uso e descarte das baterias elétricas ainda estão em fase inicial, e que novas tecnologias de processos e materiais substitutos podem contribuir com este indicador (Mahmood e Gutteridge, 2019).

4.1.2. Oportunidades e desafios para estender a vida útil das LIBs: Reusar, Reparar, Renovar, Remanufaturar e Reaproveitar

O indicador “Reusar”, recomenda para reutilização por outro consumidor do produto descartado que ainda esteja em boas condições e cumpra sua função original; de modo que neste sentido são consideradas oportunidades promissoras a utilização das *LIBs* em operações estacionárias, ou ainda para movimentar veículos que demanda menos energia e menor capacidade de armazenamento em relação ao início de vida (Ahmadi et al., 2014).

Entretanto, Zhao (2017) destacou que a margem de lucro na reutilização das baterias de íon de Lítio não é clara, embora os dados das *LIBs* sejam fornecidos pela energia do íon de Lítio, de modo que os produtores afirmam que as baterias removidas de veículos retêm 70-80% de energia útil e mostram ser competitivos em custos.

Estes dados, são utilizados como base para uma grande empresa de energia elétrica que iniciou a construção de uma usina de armazenamento de energia de 268,6 MW na província de Jiangsu, no leste da China, em que a planta de armazenamento usa baterias inservíveis de VEs, com capacidade de 75.000 kWh residuais, sendo 45MWh de baterias de Li-Fe 30MWh de baterias de chumbo-ácido; tendo assim capacidade de armazenamento adicional de 193MWh de novas *LIBs* (China.org, 2019).

Ainda, a utilização das baterias em operações estacionárias pode ser considerada a oportunidade para o indicador “Reparar”, tendo em vista que o parâmetro utilizado é o uso de produto descartado, ou suas peças em um novo produto com uma função diferente. Assim, quanto aos desafios da utilização das *LIBs* em operações estacionárias, a percepção está relacionada com as incertezas das quantidades de baterias nos mercados futuros, pois a maioria das pesquisas apontam que elas têm uma vida útil em torno de 8-10 anos (Richa et al., 2014). Cabe destacar que, quando as baterias chegam em seu fim de vida, é possível que elas possam ser remanufaturadas, sendo assim possível utilizá-las para tracionar veículos.

Neste sentido, o indicador “remanufatura”, que consiste em usar partes do produto descartado em um novo produto com a mesma função, pode ser considerada uma ótima oportunidade, pois estes processos consistem na substituição de componentes, ou células danificadas para reintegrá-las e mantê-las em uso novamente nos VEs, que também são consideradas como oportunidades na estratégia de “reaproveitar”.

Também, estimativas apontam que a fabricação de uma nova *LIB* pode custar cerca de US\$ 10.000,00, enquanto para uma *LIB* remanufaturada os custos podem representar cerca de 25% do custo de fabricação (Foster et al., 2014). Ainda, é preciso levar em conta que somente *LIBs* em fim de vida e com capacidade de recarga acima de 80% estão aptas a esta aplicação.

Por outro lado, segundo Richardson (2013), a aplicação de *LIBs* em veículos elétricos e outros sistemas de energias renováveis de armazenamento tendem a diminuir o consumo de combustíveis fósseis, entretanto o consumo de Lítio e de outros materiais que as compõem pode aumentar fortemente, além de estarem sujeitos a oscilações bruscas em seus preços. Por exemplo, o preço do Lítio no ano de 2021 está em torno de US\$ 12.000/t, e se confirmadas as previsões, este metal terá um aumento até 2025 (Costa, et al., 2021). Também, com relação ao Cobalto, outro material importante na produção das *LIBs* teve aumento significativo, variando de US\$ 30.000/t em 2019 para US\$ 43.000/t em 2021 (tradingeconomics, 2021).

No que diz respeito aos desafios da “Remanufatura” e do “Reaproveitamento”, destaca-se a ausência de processos homogêneos e consistentes, tendo em vista que as tecnologias ainda não são totalmente conhecidas e dominadas para estas aplicações.

Embora a adoção da “segunda vida” ou remanufatura das *LIBs*, juntamente com a reciclagem, podem reduzir potencialmente os custos e impactos ambientais, sendo que ambas as práticas ainda estão em fase inicial em todo o mundo, de modo que este aspecto também pode ser considerado um desafio. Entretanto, a remanufatura poderá ser um mercado importante e capaz de gerar emprego, renda, e até mesmo novas tecnologias (Jadhav, 2019).

4.1.3. Aplicação dos materiais das LIBs: oportunidades e desafios de Reciclar e Recuperar

Atualmente são conhecidos alguns processos utilizados para reciclagem das LIBs, como: o processo de separação mecânica, o processo de dissolução, o processo mecanoquímico, o processo de extração, a hidrometalurgia, a lixiviação química. Estas técnicas podem gerar valor, por meio da reciclagem de metais valiosos como Cobalto, Níquel e Lítio (Mohanty et al., 2021).

De acordo com Calma (2019), no início de 2019 havia 316 GWh de capacidade de produção global de células de Li, com a China tendo 73% desta capacidade, seguido pelos EUA com 12%; ainda com previsão de aumento para 498Kt em 2025 de Carbonato de Lítio. Consequentemente, prevê-se que poderá ocorrer falta de oferta de Li no mercado após 2023 (Coren, 2019; Carpenter, 2019). Para evitar o risco de desabastecimento e reduzir o custo de produção, é importante o desenvolvimento de experimentos e de processos para recuperar o Lítio dos os recursos potenciais. Assim, após o término de uma segunda vida em operações estacionárias, período em que as LIBs apresentam capacidade de carga menor que 60%, então poderão ser destinadas a reciclagem de seus materiais, sendo este aspecto considerado como oportunidade (Irany et al., 2019). Portanto, a reciclagem de LIBs empregadas no setor automotivo pode se tornar uma atividade lucrativa, dependendo da evolução das políticas de gestão de resíduos, em que o modelo utilizado por Castro et al., (2021) indica que os metais disponíveis para reciclagem em 2030 ultrapassarão o atual estágio de produção de Li e Co.

Quanto aos desafios, e considerando que as tecnologias de tratamento de minério são importantes para o processamento seletivo, ou separação de quaisquer materiais, e que os processos de reciclagem de materiais são baseados em tratamentos, então a associação entre a mineração e a reciclagem se torna uma alternativa para aumentar a sustentabilidade nestes processos (Luz e Lins, 2010).

Em síntese, a tabela 1 mostra as oportunidades e desafios encontrados neste estudo.

Tabela 1: Síntese de desafio estratégias da EC para LIBs.

Indicador	Parâmetro	
	Oportunidade	Desafio
Uso e fabricação mais inteligentes de produtos	<ul style="list-style-type: none"> As LIBs já são produto de recusa dos motores a combustão (Costa et al., 2021). Aumento da demanda por LIBs Castro et al (2021) 	<ul style="list-style-type: none"> Escassez de materiais (Alves Dias et al., 2018; Harvey, 2018). Tecnologias de produção e descarte em fase inicial (Mahmood e Gutteridge, 2019).
Maior vida útil do produto e de suas peças	<ul style="list-style-type: none"> Uso em operações estacionárias e em veículos menores; Ahmadi et al. (2014). Redução de custos por meio da remanufatura (Foster, et al., 2014). Uso em operações estacionárias e movimentação de veículos menores; Ahmadi et al. (2014). 	<ul style="list-style-type: none"> Incertezas das quantidades de LIBs nos mercados futuros (Richa et al., 2014). Ausência de processos homogêneos e consistentes, (Jadhav, 2017). Incertezas da vida útil em torno de 8 a 10 anos (Richa et al., 2014).
Aplicação útil de materiais	<ul style="list-style-type: none"> Possibilidade de diversificados processos de reciclagem e recuperação de materiais (Mohanty et al., 2021). 	<ul style="list-style-type: none"> Complexidade dos processos de reciclagem e recuperação (Luz e Lins, 2010).

Fonte: Autores (2021).

5. Conclusões

Os conceitos de economia circular (CE) representam uma tendência no sentido de difundir seu significado, bem como suas aplicações em diversos segmentos, como no meio acadêmico/científico, assim como o industrial.

A estrutura conceitual aqui apresentada aponta para possibilidades voltadas à um mercado futuro para as *LIBs* em seu fim de vida. Isso contribui para facilitar a avaliação dos papéis da mudança socioinstitucional, que envolve as empresas e os governos, no sentido promover inovações e medir o progresso das transições de EC para as *LIBs*. Isso poderá ser feito por meio dos indicadores 9R's, que se baseiam em uma ordem de prioridade das estratégias de circularidade, por exemplo, para 3 indicadores de desempenho que avaliam a evolução da economia linear para EC.

Ainda, a avaliação revela o papel limitado das oportunidades voltadas à inovação tecnológica aplicada as *LIBs*, bem como a dificuldade de identificar alguns desafios para algumas estratégias, devido a este mercado de baterias ainda ser muito limitado, principalmente no Brasil, por conta das quantidades insuficientes para gerar uma EC.

Na literatura científica, estudos apontam como principal sugestão para o fim de vida das *LIBs*, a sequência de uso em uma segunda vida; por exemplo, por meio da remanufatura e do reaproveitamento, assim como o uso em operação de sistemas estacionários de energia (reusar e renovar) e, finalmente para a reciclagem, etapa do ciclo de vida em que as baterias já não podem ser utilizadas em sistemas de tração, mas seus metais podem ser reaproveitados contribuindo assim com a diminuição de novas extrações da natureza, podendo gerar lucro, emprego e assim “girar” na forma de uma EC.

Ainda, entende-se que as principais limitações destes trabalhos estão relacionadas a indisponibilidade de dados do mercado das *LIBs* no Brasil, pois a quantidade de *LIBs* em fim de vida no país são desconhecidas, como também os dados dos mercados futuros estão baseados em projeções. Além disso, os processos utilizados na reciclagem, como exemplo a extração, a hidrometalurgia, lixiviação química, são sujeitos a análise de como eles funcionam no Brasil em relação as *LIBs*, podendo este tema ser abordado em trabalhos futuros.

Referências

Ademe, (2011). Etude de la seconde vie des batteries Des vehicules electriques et hybrides Rechargeables. Disponível em: https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/79604_synthese_seconde_vie_des_batteries-fr.pdf. Acesso em: 28 de mai de 2021.

Ahmadi, L.; Yip, A.; Fowler, M.; Young, S. B.; Fraser, R.A. (2014). Environmental feasibility of re-use of electric vehicle batteries. *Sustainable Energy Technology Assessments*, v.6, 64–74.

Ahuja, J.; Dawson, J; Robert, L. (2020). A circular economy for electric vehicle batteries: driving the change. *Journal of Property, Planning and Environmental Law*, v.12 (3), p. 235-250.

Altoé, L.; Costa, J.M.; Filho, D.O.; Martinez, F.J.R.; Ferrarez, A.H.; Viana, L.A. (2017). Políticas públicas de incentivo à eficiência energética. Dilemas Ambientais e Fronteiras do Conhecimento II. *Estudos avançados*, v. 3 (89), p. 285-297.

Alves Dias, P.; Blagoev, D.; Pavel, C., Arvanitidis, N., (2018). Cobalt: Demand-Supply Balances in the Transition to Electric mobility. Tech. Rep. No. EUR 29381 EN; European Commission, Joint Research Centre.

BEN. Balanço Energético Nacional - Empresa de Pesquisas Energéticas – EPE, 2019. Recuperado em 23/05/2020 de <http://www.epe.gov.br/>.

Burke, A.; Marshal, M. (2009). The UC Davis Emerging Lithium Battery Test Project. Institute of Transportation Studies. Disponível em: <https://escholarship.org/uc/item/4xn6n3xf>. Acesso: 28 mai de 2021.

Bobba, S.; Mathieux, A.; Ardente, F.; Blenginia, G.A.; Cusenac, M.A.; Pfrangd, A. (2018). Life Cycle Assessment of repurposed electric vehicle batteries: an adapted method based on modelling energy flows. *Journal of Energy Storage*, v.19, p.213-225.

Calma, J. (2019). The electric vehicle industry needs to figure out its battery problem Without recycling, electric vehicle batteries could lead to mountains of waste. Disponível em: <https://www.theverge.com/2019/11/6/20951807/electric-vehicles-battery-recycling>

Canals, C. L.; García, B. A.; Aguesse, A. F. (2015). Second life of electric vehicle batteries: relation between materials degradation and environmental impact. *Int. J. Life Cycle Assess*, (2015), v.22, p.82-93.

Carpenter, S. (2019) India's Plan To Turn 200 Million Vehicles Electric In Six Years. *Forbes Sustainability*. Disponível em: <https://www.forbes.com/sites/scottcarpenter/2019/12/05/can-indiatur-nearly-200-million-vehicles-electric-in-six-years/?sh=a0cdb4a15db5>.

Castro, F.D.; Cutaia, L.; Vaccari, M.; (2021). End-of-life automotive lithium-ion batteries (LIBs) in Brazil: Prediction of flows and revenues by 2030. *Resources, Conservation & Recycling*, v.169, 105522.

Cetesb. Companhia ambiental do estado de São Paulo. Emissões veiculares no estado de São Paulo, 2018. Recuperado em 18/06/2020 de <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2020/02/Relat%C3%B3rio-Emiss%C3%B5es-Veiculares-no-Estado-de-S%C3%A3o-Paulo-2018.pdf>.

China.org (2019). China builds large power bank with retired NEV batteries. *Business, Energy and Resources*. Disponível em: http://www.china.org.cn/business/2019-03/08/content_74545993.htm. Acesso: 28 de mai de 2021.

Coren, M.J. (2019). Researchers have no idea when electric cars are going totake over. *Quartz*. Disponível em: <https://qz.com/1620614/electric-car-forecasts-are-all-over-themap/>

Correa, G.; Muñoz, P.; Falaguerra, T.; Rodriguez, C.R. (2017) Performance comparison of conventional, hybrid, hydrogen and electric urban buses using well to wheel analysis. *Energy*, v.141, p.537–549.

Costa, C.M.; Barbosa, J.C.; Gonçalves, R.; Castro, H.; Del Campo, F.J.; Lanceros-Méndez, S. (2021). Recycling and environmental issues of lithium-ion batteries: Advances, challenges and opportunities. *Energy Storage Materials*, v. 37, p. 433-465.

D'Adamo, I.; Rosa, P. (2019) Structured Literature Review on Obsolete Electric Vehicles Management Practices. *Sustainability*, v.11, 6876 – 6893, 2019.

Davis, B.; Figliozzi, M. (2013). A methodology to evaluate the competitiveness of electric delivery trucks. *Transportation Research, E*, v. 49, p. 8-23.

Dente, S.M.R.; Tavasszy, L.A. (2018). Impacts of trade related sustainability strategies on freight transportation: Modelling framework and application for France. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v.89, 308–319, 2018.

Detransp (2019). Departamento Estadual de Trânsito de São Paulo. Frota de veículos de SP – Por tipo de veículo, 2019. Recuperado em 03/03/2020 de: <https://www.detran.sp.gov.br/>.

Emaf. Ellen Macarthur Foundation. Growth within: a Circular Economy Vision for a Competitive Europe, London. (Ellen MacArthur Foundation), 2015. Disponível em: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/EllenMacArthurFoundation_Growth-Within_July15.pdf. Acesso em: 20/04/2020.

Ertrac / Alice. Alliance for logistics innovation through collaboration in Europe. Urban Freight research roadmap, 2015. Disponível em: https://www.ertrac.org/uploads/documentsearch/id36/ERTRAC_Alice_Urban_Freight.pdf. Acesso em: 16/04/2020.

Faria, R.; Marques, P.; Garcia, R.; Moura, P.; Freire, F.; Delgado, J.; De Almeida, A.T. (2014). Primary and secondary use of electric mobility batteries from a life cycle perspective. *J. Power sources*, v.262 p. 169–177.

Foster M., Isely P., Standridge C.R., Hasan M.M. (2014). Feasibility assessment of remanufacturing, repurposing, and recycling of end of vehicle application lithium-ion batteries. *Journal of Industrial Engineering and Management*, v.7(3), p. 698-715.

Geerken, T.; Schmidt, J.; Boonen, K.; Christis, M.; Merciai, S. (2019) Assessment of the potential of a circular economy in open economies e Case of Belgium. *Journal of Cleaner Production*, v.227, p. 683-699.

Ghisellini, P.; Cialani, C.; Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, v.114, p.11 – 32

Goes, G.V.; Schmitz, D.N.; Bandeira, R.A.M.; Oliveira, C.M.; D’agosto, M.A. (2018). Sustentabilidade na última milha do transporte urbano de carga: o papel da eficiência energética do veículo. *Sustentabilidade em Debate - Brasília*, v. 9, n.2, p. 134-144.

Graditi, G.; Langella, G.; Laterza, C.; Valenti, M. (2015) Conventional and electric vehicles: A complete economic and environmental comparison. In Proceedings of the ICCEP 2015-5th International Conference on Clean Electrical Power: Renewable Energy Resources Impact, Taormina, Italy, v.16–18 p.660–665

Harvey, L.D.D., 2018. Resource implications of alternative strategies for achieving zero greenhouse gas emissions from light-duty vehicles by 2060. *Appl. Energy*, v.212, p. 663–679.

Hua, Y.; Zhou, S.; Huang, Y.; Liu, X.; Ling, H.; Zhou, X.; Zhang, C.; Shichun, Y. (2020) Sustainable value chain of retired lithium-ion batteries for electric vehicles, *J. Power Source*, v.478, 228753.

Jones, B.; Elliott, R.J.R.; Nguyen-Tien, V. (2020). The EV revolution: the road ahead for critical raw materials demand. *Applied Energy*, v.280, 115072.

IEA, 2020. Global EV Outlook 2020: Entering the Decade of Electric drive? IEA Publications, Paris.

Irany, R.; Aancha, K.; Daniel, G.; Arwa, G. (2019) Energy Storage Monitor. World Energy Council. Disponível em: https://www.worldenergy.org/assets/downloads/ESM_Final_Report_05-Nov-2019.pdf.

ISO, 2006. Norma internacional ISO 14040. Gestão Ambiental -Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estrutura. Organização internacional para padronização, Genebra, Suíça, 2006.

Jadhav, A. (2019). Electric Vehicle Battery Recycling Market by Application (Electric Cars, Electric Buses, Energy Storage Systems, and Others): Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2018 – 2025. Disponível em: <https://www.alliedmarketresearch.com/electric-vehicle-battery-recycling-market>. Acesso 28 de mai de 2021.

Kala, S.; Mishra, A. (2021) Battery recycling opportunity and challenges in India. *Materials Today Proceedings*, v.xx, xxx-xxx.

Kirchherr, J.; Piscicelli, L. (2019) Towards an Education for the Circular Economy (ECE): Five Teaching Principles and a Case Study. *Resources, Conservation & Recycling*, v.150 p.104 - 406.

Koch-Ciobotaru, C.; Saez-de-Ibarra, A.; Martinez-Laserna, E.; Stroe, D.I.; Swierczynski, M.; Rodriguez, P. (2015) Second life battery energy storage system for enhancing renewable energy grid integration, *Energy Convers. Congr. Expo. (ECCE)*. P.78–84.

Korhonen, J.; Honkasalo, A.; Seppälä, J. (2018) Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics*, v.143, p. 37-46.

Lave, L.B.; Maclean, H.L. (2002) An environmental-economic evaluation of hybrid electric vehicles: Toyota's Prius vs. its conventional internal combustion engine Corolla. *Transport and Research Part D*, v.7, p.155–162.

Lin, C., Choy, K.; Ho, G.; Chung, S.; Lam, H. (2014). Survey of green vehicle routing problem: past and future trends. *Expert Systems Applications*, v. 41, p. 1118–1138.

Luz, A.B., Lins, F.A.F., 2010. Introdução ao tratamento de minérios (Introduction to the treatment of ores). In: Luz, A.B., Sampaio, J.A., França, S.C.A (Eds.) CETEM/MCT, Rio de Janeiro, p. 3–18.

Mahmood, K., Gutteridge, F., (2019). EV Batteries Remanufacturing: BORG Automotive Challenge - Team 33. Reman Challenge BORG June 2019, Amsterdam, Netherlands. Disponível em: https://pure.strath.ac.uk/ws/portalfiles/portal/89965566/Mahmood_Gutteridge_BORG_2019_EV_batteries_remanufacturing_BORG_automotive.pdf. Acesso em: 28 de mai de 2021.

Manzetti, S.; Mariasiu, F. (2015). Electric vehicle battery technologies: From present state to future systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 51, 1004–1012.

Milanez, A.Y.; Mancuso, R.V; Godinho, R.D; Poppe, M.K. (2017). O acordo de Paris e a transição para o setor de transportes de baixo carbono: o papel da plataforma para o biofuturo. *Biocombustíveis BNDES Setorial*, v. 45, p. 285-340.

Mohanty, A.; Sibananda, S.; Sukla, L.B.; Devi, N.(2021). Application of various processes to recycle lithium-ion batteries (LIBs): A brief review. *Journal of Power Sources*, v.207, p. 173-182.

Pagliaro, M.; Meneguzzo, F. (2019) Review Article Lithium battery reusing and recycling: A circular economy insight. *Heliyon*, v. 5 (6) e01866.

- Potting, J.; Hekkert, M. P.; Worrell, E. (2017). Circular Economy: Measuring innovation in the product chain. Policy Report, Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague.
- Qiao, Q.; Zhao, F.; Liu, Z.; He, X.; Hao, H. (2019). Life cycle greenhouse gas emissions of Electric Vehicles in China: Combining the vehicle cycle and fuel cycle. *Energy*, v. 177, p.222–233.
- Quak, H., Nesterova, N., Rooijeni, T. V. (2016). Possibilities and barriers for using electric-powered vehicles in city logistics practice. *Transportation Research Procedia*, v. 12, p. 157-169.
- Ranieri, L.; Digiesi, S; Silvestri, B.; Roccotelli, M. A review of last mile logistics innovations in an externalities cost reduction vision. *Sustainability*, v.10, n.3, 782-800, 2018.
- Reach \$2,272.3 Million by 2025,” 2017. Disponível em: <https://www.alliedmarketresearch.com/press-release/electric-vehicle-battery-recyclingmarket.html>. Acesso: 20 de mai de 2021.
- Richa, K., Babbitt, C.W., Gaustad, G., Wang, X., (2014). A future perspective on lithium-ion battery waste flows from electric vehicles. *Resource Conservation and Recycling*, v.83, p. 63–76.
- Richa, K.; Babbitt, C.W.; Nenadic, N.G.; Gaustad, G. (2015) Environmental trade-offs across cascading lithium-ion battery life cycles. *Int. J. Life Cycle Assess.* v.20, p. 1-16.
- Richardson, D.B. (2013). Electric vehicles and the electric grid: a review of modeling approaches, Impacts, and renewable energy integration. *Renewable Sustain. Energy*, v.19, p.247–254.
- Sabbaghi, M.; Esmailian, B.; Raihanian, M.A.; Cade, W.; Behdad, S.; Reusabil, I. (2015). Assessment of Lithium-Ion Laptop Batteries Based on Consumers Actual Usage Behavior. *Journal of Mechanical Design*, v.137(12), p xx.
- Sathre, R.; Scown, C.D.; Kavvada, O.; Hendrickson, T.P. (2015). Energy and climate effects of second-life use of electric vehicle batteries in California through 2050. *Journal of Power Sources*, v.288, p. 82–91.
- Souza, L.L.P.; Lora, E.E.S.; Palacio J.C.E; Rocha R.H.; Renó M.L.G.; Venturini, O.J. (2018). Comparative environmental life cycle assessment of conventional vehicles with different fuel options, plug-in hybrid and electric vehicles for a sustainable transportation system in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v.203, p444 - 468.
- Tao, J.; Chen, Z.; Yu, S.; Liu, Z. (2017). Integration of Life Cycle Assessment with computer-aided product development by a feature-based approach. *Journal of Clean Production*, v.143, p.1144 – 1164.
- Testa, F.; Nucci, B.; Tessitore S.; Iraldo, F.; Daddi, T. (2016) Perception on LCA implementation: evidence from a survey on adopters and nonadopters in Italy. *Int. J. Life Cycle Assess.* v. 21, p.1501-1513.
- Tradingeconomics (2021). Disponível em: <https://pt.tradingeconomics.com/commodity/lithium>. Acesso: 28 de mai de 2021.
- Vacca, L., 2020. Development of a test protocol for remanufacturing of automotive batteries and model-based cell repurposing (Master Thesis). Politecnico di Torino. Disponível em: <https://webthesis.biblio.polito.it/14011/1/tesi.pdf>. Acesso: 28 de mai de 2021.

- Van Buren, N.; Demmers, M.; Van Der Heijden, R; Witlox, F. (2016). Towards a circular economy: the role of dutch logistics industries and governments. *Sustainability*, v.8, p. 647 – 661.
- Wang, L., Wang, X., Yang, W., 2020. Optimal design of electric vehicle battery recycling network – From the perspective of electric vehicle manufacturers. *Appl. Energy*, v.275, 115328.
- Wang, W.; Wu, Y. (2017) An overview of recycling and treatment of spent LiFePO₄ batteries in China. *Resour. Conserv. Recycl.* v.127, p.233–243
- Xing, Y; Song, H.; Yu, M.; Wang, C.; Zhou, Y.; Liu, G.; Du, L. (2016). The characteristics of greenhouse gas emissions from heavy-duty trucks in the beijing-tianjin-hebei (BTH) region in China. *Atmosphere*, v.7, n.9, p 121-134, 2016.
- Zhao, T.; Yao, Y.; Wang, M.; Chen, R.; Yu, Y.; Wu, F. (2017). Preparation of MnO₂-modified graphite sorbents from spent Li-ion batteries for the treatment of water contaminated by lead, cadmium, and silver. *ACS Application Matererial Interface*, v.9, p.25369–25376.