



Campus São Mateus
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO



RECICLAGEM DE BATERIAS DE ÍON-LÍTIO: UMA BREVE REVISÃO SOBRE OS PROCESSOS, AVANÇOS E PERSPECTIVAS

RECYCLING OF LITHIUM-ION BATTERIES: A BRIEF REVIEW OF PROCESSES, ADVANCEMENTS, AND PROSPECTS

RECICLAJE DE BATERÍAS DE IONES DE LITIO: UNA BREVE REVISIÓN DE PROCESOS, AVANCES Y PERSPECTIVAS

Yago Henrique Barbosa Moreira ¹, Diunay Zuliani Mantegazini ², George Ricardo Santana Andrade ³, & Marcelo Silveira Bachelos ^{4*}

^{1,2} Departamento de Engenharias e Tecnologia (DET), Centro Universitário Norte do Espírito Santo (CEUNES), Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). ^{3,4} Programa de Pós-Graduação em Energia, Centro Universitário Norte do Espírito Santo (CEUNES), Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

¹ yago.henrique94@gmail.com ² george.andrade@ufes.br ³ diunaymantegazini@gmail.com ^{4*} marcelo.bachelos@ufes.br

ARTIGO INFO.

Recebido: 01.11.2023

Aprovado: 29.12.2024

Disponibilizado: 06.02.2024

PALAVRAS-CHAVE: Biometalurgia; Reciclagem; Hidrometalurgia; Indução térmica; Pirometalurgia.

KEYWORDS: Biometallurgy; Recycling; Hydrometallurgy; Thermal induction; Pyrometallurgy.

PALABRAS CLAVE: Biometalurgia; reciclaje; Hidrometalurgia; Inducción térmica; Pirometalurgia.

*Autor Correspondente: Bachelos, M. S.

RESUMO

Este estudo apresenta uma breve revisão sobre os processos convencionais (pirometalurgia e hidrometalurgia) e alternativos (reciclagem direta, biometalurgia, campo elétrico e por indução térmica) de reciclagem de baterias de íon-Lítio (LIBs). Estes são responsáveis por recuperar materiais valiosos como o lítio, níquel, cobalto, manganês, cobre, alumínio e grafite. Neste trabalho, realizou-se uma pesquisa bibliográfica e documental com a finalidade de obter embasamento teórico consistente para comparar diversas tecnologias de reciclagem de LIBs, a fim de atender a demanda crescente de produção de veículos eletrônicos a bateria (VEBs). Os dados revelam que a reciclagem alternativa é mais eficiente e sustentável quando comparada à convencional. Entretanto, o uso comercial da reciclagem convencional ainda persiste devido ao estabelecimento de tecnologias e infraestrutura em larga escala de produção. Os gargalos tecnológicos associados à reciclagem alternativa precisam ser superados para dar sustentação à cadeia produtiva de LIBs e atender à crescente demanda de VEBs. Estes desafios devem promover o desenvolvimento de tecnologias inovadoras e sustentáveis de reciclagem alinhadas às políticas de gestão de resíduos sólidos e aos padrões internacionais de reciclagem de baterias de lítio.

ABSTRACT

This work presents a brief review of conventional (pyrometallurgy and hydrometallurgy) and alternative recycling processes of LIBs (direct recycling, bio-metallurgy, electric field, and thermal induction), which are responsible

for recovering valuable materials such as Li, Ni, Co, Mn, Cu, Al and graphite. Bibliographic and documental research was used to state comparisons between different technologies. Research findings reveal that alternative recycling is more efficient and sustainable when compared to conventional methods. However, the commercial use of conventional processes persists due to their established technologies and large-scale production infrastructure. Therefore, overcoming technological bottlenecks associated with alternative recycling will support the lithium battery (LIB) production chain, meeting the growing demand in the electric vehicle market. Technological challenges need to foster the development of innovative and sustainable recycling technologies for lithium batteries in line with solid waste management policies.

RESUMEN

Este trabajo aborda un breve análisis de los métodos convencionales, como la pirometalurgia e hidrometalurgia, y enfoques alternativos, que incluyen el reciclaje directo, la biometalurgia, el campo eléctrico y la inducción térmica, aplicados al reciclaje de baterías de iones de litio (LIBs). El objetivo central de estos métodos es la recuperación de materiales valiosos, como litio, níquel, cobalto, manganeso, cobre, aluminio y grafito. En el desarrollo de esta investigación, una revisión bibliográfica y documental detallada fue realizada para establecer una base teórica sólida, permitiendo una comparación profunda entre varias tecnologías de reciclaje de LIB. Los datos obtenidos resaltan la eficiencia y sostenibilidad superiores del reciclaje alternativo en comparación con enfoques convencionales. Sin embargo, a pesar de estas ventajas evidentes, el persistente uso comercial del reciclaje convencional se debe principalmente a la consolidación de tecnologías e infraestructuras de producción a gran escala. Es crucial abordar y superar los desafíos tecnológicos asociados al reciclaje alternativo para garantizar la sostenibilidad y eficacia continuas de la cadena de producción de baterías de iones de litio. Los desafíos identificados en este estudio deben servir como estímulo para el desarrollo continuo de tecnologías de reciclaje innovadoras y sostenibles, alineadas integralmente con políticas de gestión de residuos sólidos y estándares internacionales de reciclaje de baterías de litio.

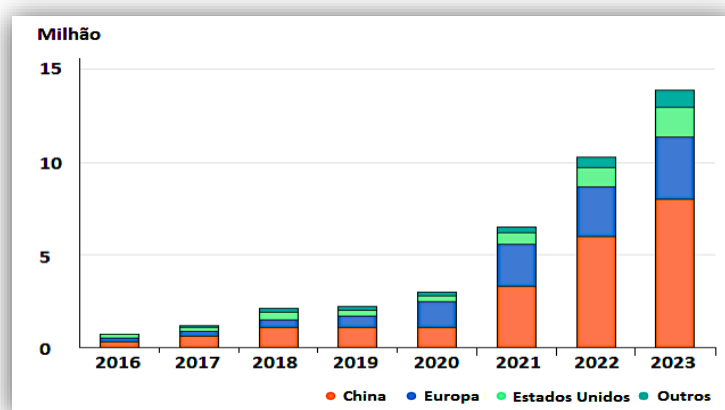
1. INTRODUÇÃO

Proposto na 21ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas em 2015, o Acordo de Paris estabeleceu diretrizes para a redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no planeta (Feng et al., 2022; Pang et al., 2023; Salman et al., 2022). Seu principal objetivo de longo prazo consistiu em manter o aumento da temperatura média global abaixo de 2°C em relação à era pré-industrial (Dong et al., 2018; Khabbazan & von Hirschhausen, 2021). Nesse contexto, a crescente adoção de Veículos Elétricos a Bateria (VEBs) emerge como uma solução promissora para reduzir as emissões de carbono no setor de transportes, o qual é responsável por 16% das emissões globais (IEA, 2023).

Os VEBs são considerados alternativas ecologicamente corretas para os veículos movidos a combustíveis fósseis e uma tecnologia chave para descarbonizar o setor de transporte. O mercado de VEBs tem apresentado um crescimento exponencial, como mostra a Figura 1, sendo a China o país que liderou as vendas de VEBS nos últimos anos, contribuindo com cerca de 39% das vendas globais (Yu et al., 2023). Adicionalmente, estima-se que a quantidade de veículos elétricos no mundo alcance 140 milhões em 2030, representando cerca de 10% da quantidade total de veículos (Silva et al., 2019). Com base nas tendências atuais, espera-se que a implantação de VEBs evite a utilização de 5 milhões de barris de petróleo por dia até 2030 (IEA, 2023).

No contexto dos VEBs, as baterias utilizadas, como as Baterias de Íon-Lítio (LIBs), devem ser substituídas após um período de 5 a 8 anos de uso ou quando a capacidade dessa cair para cerca de 70% a 80% da sua capacidade inicial (Lai et al., 2022). No entanto, o crescimento na utilização de LIBs possui impactos significativos ao meio ambiente, incluindo o esgotamento dos recursos naturais utilizados para a produção (Bhar et al., 2023; Kader et al., 2021) e, quando descartados inadequadamente, problemas ambientais, como a poluição por metais pesados e eletrólitos, ameaçando o meio ambiente e a saúde humana (J. Li et al., 2023). O descarte inadequado dessas LIBs também levará ao desperdício de inúmeros recursos valiosos, como o lítio (Li), níquel (Ni), cobalto (Co), manganês (Mn), cobre (Cu), alumínio (Al) e grafite (G. Zhang et al., 2023). Dessa forma, a reciclagem e a reutilização das LIBs usadas têm recebido cada vez mais atenção de diversos pesquisadores (Pinegar & Smith, 2019)

Figura 1. Vendas de carros elétricos, 2016 - 2023.



Fonte: IEA (2023).

A reciclagem de LIBs tem sido realizada por meio de processos mecânicos, pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos (Kim et al., 2021), entretanto, esses processos apresentam desvantagens, como alto custo energético e baixa eficiência na recuperação de metais (Mantuano et al., 2011). Várias pesquisas têm sido realizadas para minimizar essas desvantagens, destacando-se alguns processos alternativos de reciclagem, como a reciclagem direta, biometalurgia, reciclagem conduzida por campo elétrico e reciclagem por indução térmica (Horeh et al., 2016; Kasprzak et al., 2017; Lv et al., 2021).

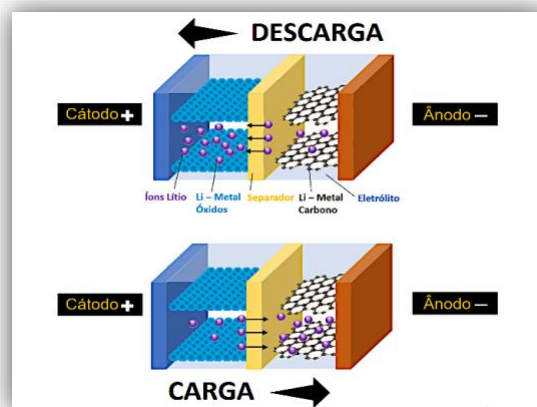
Na tentativa de contribuir com o futuro cenário do setor de energia e transporte, é apresentada uma breve revisão bibliográfica e documental sobre tecnologias de reciclagem. Para isso, utiliza-se como fontes de dados científicos a base Scopus, ScienceDirect, SciELO e ACS Journal Search por meio do portal de periódicos Capes. Também, são consultados *sites* de organizações privadas e governamentais especializadas em reciclagem de LIBs.

Em atendimento às futuras demandas do setor de energia e transporte, esta breve revisão, também, aponta contribuições fundamentadas em metas de mudanças climáticas, pois visa atender à crescente demanda global por veículos elétricos. Baseado em uma economia circular e práticas sustentáveis evidencia-se que novos processos industriais devem estar alinhados aos acordos internacionais e produzir baterias com materiais recicláveis, seguindo os padrões internacionais de reciclagem.

2. BATERIAS DE ÍON-LÍTIO

Para garantir um desempenho estável de carga e descarga e aplicação a longo prazo, as LIBs possuem estruturas complexas (Figura 2).

Figura 2. Esquema de uma bateria de lítio.



Fonte: Autores (2023).

As LIBs são compostas por diversos componentes, incluindo o ânodo, o cátodo, o eletrólito e o separador (Leal et al., 2023; Pang et al., 2023; S. Rangarajan et al., 2022). Durante o carregamento, os íons de lítio (Li^+) são movidos do cátodo para o ânodo através do eletrólito. Esse processo é reversível, permitindo que a bateria seja recarregada. Quando a bateria está descarregando, os íons Li^+ se movem do ânodo para o cátodo, gerando eletricidade. O separador impede que os dois eletrodos entrem em contato direto e causem um curto-circuito (Goodenough & Park, 2013).

A composição química de cada componente varia de uma tecnologia para outra, dependendo da aplicação da bateria. Por exemplo, pelo menos seis tipos de materiais catódicos foram aplicados em LIBs comerciais, incluindo óxido de cobalto e lítio (LiCoO_2), óxido de níquel e lítio (LiNiO_2), óxido de manganês e lítio (LiMn_2O_4), fosfato de ferro e lítio (LiFePO_4), óxido de lítio níquel manganês e cobalto (LiNiMnCoO_2), óxido de lítio níquel cobalto e alumínio (LiNiCoAlO_2) (Yu et al., 2023). O principal objetivo do uso de óxidos mistos é obter materiais baratos e ecologicamente corretos, mantendo alto desempenho eletroquímico.

O ânodo é geralmente constituído de grafite, enquanto que o eletrólito, responsável pelo transporte de cargas de um eletrodo para outro, é geralmente uma solução de sal de lítio dissolvido em solventes orgânicos. Os sais mais comuns são hexafluorofosfato de lítio (LiPF_6), tetrafluorborato de lítio (LiBF_4), trifluorometanosulfonato de lítio (LiCF_3SO_3), e o Bis-trifluorometanosulfonato de lítio ($\text{Li}(\text{SO}_2\text{CF}_3)_2$).

Os solventes utilizados no processo precisam, além de dissolver completamente os sais de lítio, apresentar viscosidade compatível com a aplicação. Solventes muito viscosos podem dificultar a movimentação de íons Li^+ , impactando negativamente na condutividade do eletrólito (Du et al., 2022).

Neste contexto, os solventes mais comuns são o dimetilcarbonato ($\text{OC}(\text{OCH}_3)_2$), carbonato de dietila ($\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_3$), carbonato de propileno ($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_3$) e dimetilsulfóxido ($\text{C}_2\text{H}_6\text{OS}$). Já o separador é feito de materiais porosos que impedem o contato direto entre o ânodo e o cátodo (Leal et al., 2023). O separador é uma membrana permeável colocada entre o ânodo e o cátodo da bateria, cuja função é impedir o contato físico entre os eletrodos e permitir o transporte iônico através do eletrólito.

3. DEMANDA DE LÍTIO

A importância do Li vem crescendo gradativamente com o aumento da produção de equipamentos eletrônicos e VEBs devido as suas propriedades (Mishra et al., 2022). O Li apresenta diversas propriedades que o torna apto para aplicação em materiais para VEBs, incluindo: (a) capacidade de armazenar uma quantidade significativa de energia em relação ao seu tamanho e peso; (b) apresenta uma baixa taxa de autodescarga; (c) possui um ciclo de vida longo; e (d) é altamente versátil, podendo ser combinado em várias formulações, como LiFePO_4 , LiMn_2O_4 , LiNiMnCoO_2 , LiCoO_2 e LiNiCoAlO_2 , proporcionando diferentes características eletroquímicas e adaptando-se a diversas aplicações.

No que diz respeito ao fornecimento de matéria-prima, mais de 90% da produção primária de Li ocorreu em três países, Austrália (47,1%), Chile (30,1%), China (14,6%) no ano de 2022. O Brasil aparece na lista em quinto lugar com 1,7%, atrás apenas da Argentina com 4,7% (USGS, 2023). Atualmente, cerca de 35% do Li produzidos mundialmente é usado na fabricação de LIBs e estima-se que um pequeno incremento na produção desse metal pode não equilibrar a cadeia de oferta e demanda (Mishra et al., 2022). A crescente demanda ocasionou um aumento de 58% no preço do Li, atingindo a média de US\$ 11.000/tonelada em 2021 (BP, 2021). À medida que a demanda por LIBs aumenta, a necessidade de tecnologias de reciclagem eficaz se torna ainda mais importante.

As LIBs usadas contêm materiais valiosos, como Li, Mn, Ni e Co (Liu et al., 2019; Mishra et al., 2022). No entanto, apenas 5% das LIBs usadas são recicladas globalmente (UNEP, 2023). Diversos fatores contribuem para a baixa taxa de reciclagem das LIBs, como o alto custo associado ao processo de reciclagem. O processo de reciclagem é complexo e requer tecnologias avançadas, o que pode elevar os custos da reciclagem das baterias (Du et al., 2022). Além disso, a falta de infraestrutura adequada para a reciclagem de LIBs é outro desafio significativo. Em países subdesenvolvidos ou até mesmo em desenvolvimento, não há instalações de reciclagem equipadas para lidar adequadamente com o descarte das baterias.

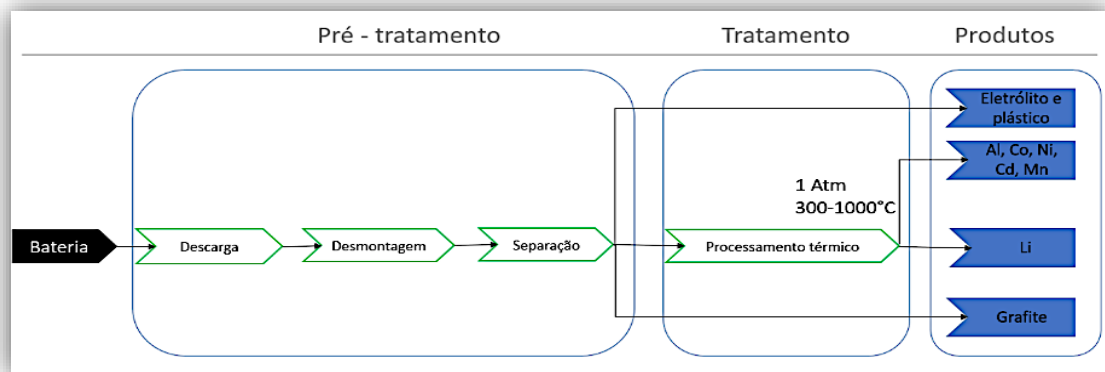
4. PROCESSOS CONVENCIONAIS DE RECICLAGEM DE BATERIA ÍON-LÍTIO

Para suprir a demanda em constante crescimento por VEBs torna-se essencial direcionar investimentos em tecnologias inovadoras e sustentáveis para a reciclagem de LIBs, bem como em processos avançados voltados para o desenvolvimento de novos materiais destinados a baterias. A seguir, serão apresentados os processos convencionais de reciclagem de LIBs.

4.1 PIROMETALURGIA

O processo de reciclagem das LIBs por meio da pirometalurgia consiste na separação dos materiais metálicos dos materiais não metálicos por meio do tratamento térmico, como a fusão, calcinação e volatilização (Velázquez-Martínez et al., 2019). O processo pirometalúrgico consiste nas etapas de pré-tratamento e tratamento, conforme a Figura 3.

Figura 3. Diagrama do processo pirometalúrgico.



Fonte: Autores (2023).

O processo de pré-tratamento consiste nas etapas de descarga, desmontagem e separação dos componentes das LIBs. A desmontagem e separação dos componentes das LIBs têm como objetivo separar os metais de alto valor agregado, como Li, Co e Pb, dos materiais não metálicos e tóxicos, como plásticos e eletrólitos. Enquanto que, no processo de tratamento, os componentes metálicos são submetidos a um tratamento térmico, geralmente pirólise.

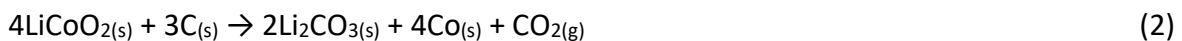
A utilização da pirólise na reciclagem de LIBs desempenha um papel crucial na separação eficiente dos componentes constituintes da bateria, contribuindo para a redução do volume de resíduos gerados e a mitigação do impacto ambiental associado à disposição inadequada das LIBs. Durante o processo de pirólise, a bateria é submetida a altas temperaturas, geralmente acima de 300°C, em um ambiente controlado para evitar a combustão dos materiais orgânicos (Li et al., 2018).

Durante a pirometalúrgica ocorrem diversas reações físico-químicas, tais como fusão, volatilização, redução e oxidação dos materiais presentes na bateria, que contribuem para a separação e recuperação dos metais. Uma das principais reações envolvidas nesse processo é a redução de óxidos metálicos. Óxidos metálicos presentes na bateria, como óxido de cobre (CuO), óxido de alumínio (Al₂O₃) e óxido de chumbo (PbO), são submetidos a altas temperaturas. O agente redutor, normalmente carbono na forma de coque, carvão ou CO, reage com o oxigênio do óxido, resultando na formação de gases, como CO e CO₂, e na redução dos óxidos para seus respectivos metais (Makuza et al., 2021). Por exemplo, o CuO pode ser reduzido a cobre metálico pela seguinte reação:



De acordo com Makuza et al. (2021), as reações abaixo representam os principais processos de redução e decomposição dos materiais presentes nas LIBs:

Reação global de Decomposição do LiCoO₂:



Decomposição do LiCoO₂:



Redução carbotérmica do óxido de cobalto (CoO) por carbono e CO:



Combustão completa e incompleta do carbono:



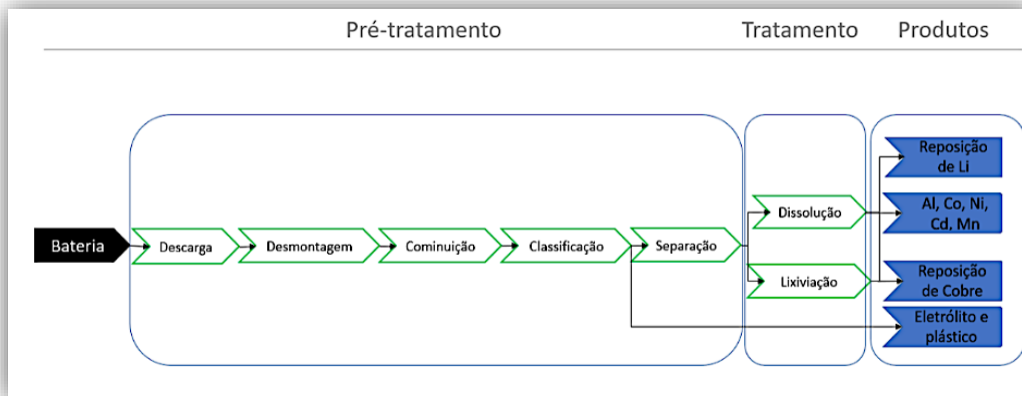
Segundo Makuza et al. (2021), durante o processo, ocorre a fusão dos metais presentes nas LIBs. O aumento da temperatura provoca o estado líquido ou pastoso dos metais, permitindo sua separação dos materiais não metálicos. Outra reação que pode ocorrer é a oxidação de metais, como ferro e níquel, durante o processo de redução pirometalúrgica. Essa oxidação é resultado da reação dos metais com o oxigênio presente na atmosfera ou com impurezas oxidadas presentes nos materiais da bateria. Essa reação forma óxidos metálicos, como óxido de ferro (Fe₂O₃) e óxido de níquel (NiO).

A reciclagem de LIBs por meio de processos pirometalúrgicos é amplamente adotada devido à sua eficiência e características favoráveis, como a ausência de efluentes líquidos e o alto grau de flexibilidade na aceitação de diferentes materiais compostos por misturas de metais ou ligas metálicas (Li et al., 2018). No final do processo de pirometalúrgica, os metais são recuperados na forma de ligas ou compostos metálicos. Esses materiais podem passar por etapas adicionais de purificação e serem utilizados como matéria-prima na fabricação de novas LIBs ou em outras aplicações industriais.

4.2 HIDROMETALURGIA

O processo de reciclagem hidrometalúrgica envolve a dissolução dos componentes das LIBs em soluções químicas, permitindo a extração e recuperação dos metais presentes nas mesmas (Jin et al., 2022). Os tratamentos hidrometalúrgicos são flexíveis, ecológicos, consomem menos energia, têm taxa de reação aceitável, não contaminam o ar e fornecem metais valiosos mais puros (Golmohammadzadeh et al., 2018). O processo hidrometalúrgico consiste nas etapas de pré-tratamento e tratamento, conforme a Figura 4.

Figura 4. Processo da recuperação de Li por hidrometalurgia.



Fonte: Autores (2023).

Conforme mostrado na Figura 4, o processo hidrometalúrgico tem início com o pré-tratamento, etapa similar ao processo pirometalúrgico. Nessa etapa é realizada a descarga, desmontagem e a cominuição das LIBs, onde estas são trituradas para a que ocorra a redução do seu tamanho e conseqüentemente o aumento da eficiência do processo de reciclagem. Para finalizar essa etapa, ocorre a separação e classificação dos componentes, onde é feita a remoção dos materiais metálicos por meio de processos mecânicos, como a separação magnética e a flotação permitindo a sua recuperação individual (Mossali et al., 2020). Na sequência, os componentes não-metálicos, como os plásticos e eletrólitos, são tratados e reciclados para minimizar os impactos ambientais.

Finalmente, na etapa de tratamento, técnicas como de lixiviação, extração seletiva de metais e precipitação são utilizadas para separar e recuperar os metais presentes nas LIBs (Li et al. 2018). No processo de lixiviação, os materiais oriundos do pré-tratamento são atacados quimicamente, resultando em uma solução que será na sequência tratada para que ocorra a separação e obtenção dos produtos. Os processos de lixiviação podem ser divididos em lixiviação alcalina com amônia (NH_3) e/ou sulfato de amônio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) e sulfito de amônio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$); lixiviação com ácido inorgânico (ácido clorídrico (HCl) e ácido sulfúrico (H_2SO_4), com o agente redutor peróxido de hidrogênio (H_2O_2)); lixiviação com ácido orgânico (ácido metanoico (CH_2O_2) e (H_2O_2)) como agente redutor e ácido oxálico ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) e biolixiviação (Magdalon, 2021). Em condições naturais, o processo de tratamento por meio da lixiviação é lento e a concentração dos metais lixiviados é baixa. Porém, a taxa de extração pode ser acelerada ajustando-se adequadamente as condições operacionais do processo, incluindo a temperatura, pressão, pH e tempo de exposição do lixiviante com o mineral.

De acordo com Li et al. (2018) após o processo de lixiviação, inicia-se a segunda etapa que consiste na remoção de impurezas por meio de filtração, decantação ou centrifugação. Em seguida, ocorre a recuperação do cobre através de uma etapa de deposição eletrolítica. Nesse processo, a solução contendo os íons de cobre é submetida a uma corrente elétrica em uma célula eletrolítica. O cobre é atraído para o cátodo da célula eletrolítica, onde se deposita como um metal puro. Quanto aos outros metais, como Li, Ni, Mn, Al e grafite, podem ser recuperados por meio da dissolução em solventes químicos apropriados. Esses solventes dissolvem os metais desejados, formando complexos solúveis como o carbonato de lítio (Li_2CO_3), fosfato de lítio (Li_3PO_4) e hidróxido de lítio (LiOH).

Após a dissolução, os metais são separados dos outros componentes da bateria e recuperados por meio de técnicas de extração seletiva, como extração por solvente ou precipitação química. Essas técnicas permitem a separação dos metais dissolvidos, de modo que eles possam ser recuperados em sua forma pura ou utilizados em processos posteriores.

Um exemplo de reação de dissolução que ocorre no processo de recuperação do Li é a seguinte:



Nessa reação, o Li reage com a água para formar LiOH e liberar hidrogênio gasoso (H_2). Essa é uma reação de dissolução do Li em água, que pode ser controlada e ajustada para obter a dissolução completa do metal.

5. PROCESSOS ALTERNATIVOS DE RECICLAGEM

5.1 DIRETA

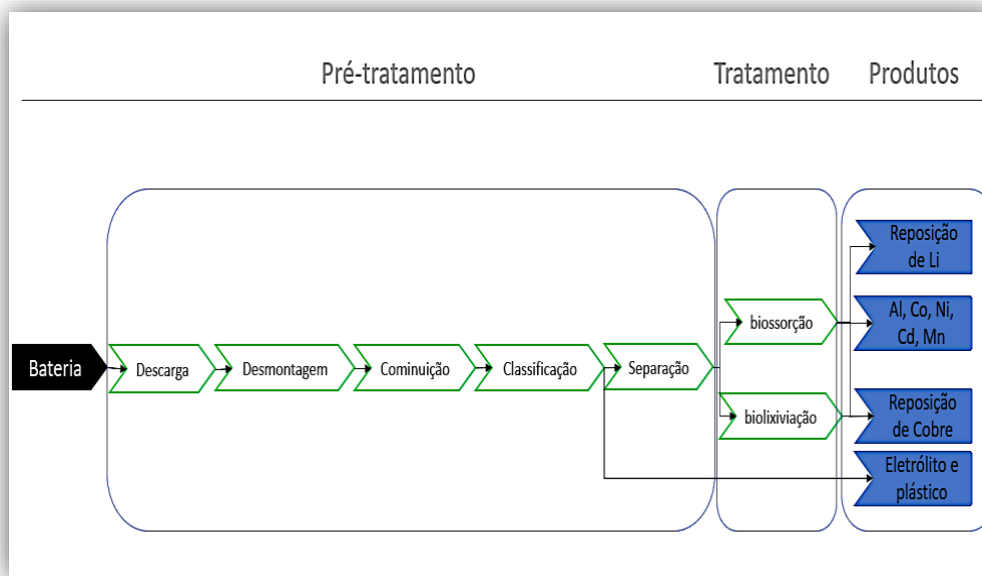
A reciclagem direta é um método não destrutivo permitindo que os cátodos gastos sejam diretamente regenerados em novos materiais ativos para reutilização (N. Zhang et al., 2022). Esse processo emergiu recentemente como uma solução promissora a nível laboratorial, oferecendo vantagens significativas em termos de consumo de energia, segurança, custo, flexibilidade, meio ambiente e retorno econômico em comparação com métodos de reciclagem pirometalúrgica e hidrometalúrgica (Wei et al., 2023).

No entanto, para que a reciclagem direta possa ser efetiva em termos ambientais e econômicos, é necessário enfrentar uma série de desafios, como a escala de produção, a qualidade dos materiais e a viabilidade econômica (Singh, 2022). Como mencionado, as LIBs são normalmente compostas por cátodos, ânodos, eletrólitos, separadores e invólucros. Alcançar a separação eficaz desses componentes é desejável para maximizar a recuperação de materiais valiosos. Mas, a natureza complexa e diversificada das LIBs tem dificultado a adoção de soluções automatizadas de desmontagem. Como resultado, o trabalho manual continua a ser a principal abordagem para a desmontagem das LIBs em curto prazo. Além disso, é necessário ressaltar os riscos inerentes, por exemplo, o eletrólito utilizado nas LIBs contém frequentemente solventes tóxicos, o que representa riscos para a saúde durante o processo de desmontagem (Wei et al., 2023).

5.2 BIOMETALURGIA

O processo de biometalurgia ou biohidrometalúrgico é uma tecnologia emergente que apresenta vantagens potenciais no tratamento de resíduos de forma ecologicamente correta, por meio da utilização de microrganismos para recuperar metais de minérios, concentrados e materiais reciclados ou residuais na metalurgia extrativa aquosa (Roy et al., 2021). No processo de reciclagem utilizando biometalurgia, as LIBs são submetidas a um pré-tratamento que envolve a desmontagem e separação de seus componentes. Em seguida, o material é submetido a processos de biolixiviação e bioissorção (Figura 5).

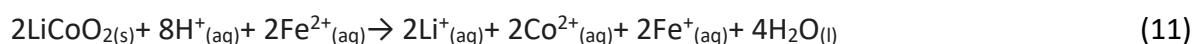
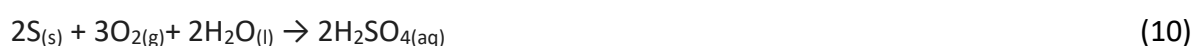
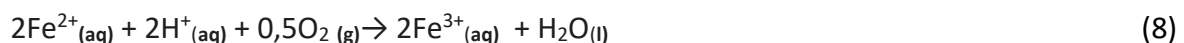
Figura 5. Processo da recuperação de Li por biometalurgia.



Fonte: Autores (2023).

Dentre os microrganismos aptos para esta aplicação, destacam-se algumas espécies de fungos, como *Aspergillus niger*, e bactérias acidófilas, como *Acidithiobacillus ferrooxidans* e *Acidithiobacillus thiooxidans* (Liao et al., 2023; Moazzam et al., 2021). O processo de biolixiviação é mais ecologicamente correto do que outros processos físico-químicos porque é realizado em baixas temperaturas, requer menos energia e menos emissões de gases tóxicos (Roy et al., 2021).

A recuperação de Li e Co de LIBs por bactérias acidófilas por oxidação de compostos ferrosos e sulfurosos produz ácido sulfúrico. De acordo com Rautela et al. (2023), as reações de oxidação podem ser representadas pelas seguintes equações:



Após a etapa de biolixiviação, os íons metálicos solubilizados na solução são recuperados por meio de técnicas de extração seletiva, como precipitação, biossorção, adsorção ou eletrodeposição, para obter os metais desejados em forma purificada. A biossorção é utilizada como um processo subsequente à biolixiviação, sendo considerada uma opção eficiente e de baixo custo para a recuperação de íons metálicos de uma fase aquosa.

Um processo de biossorção tem duas fases: o biossorvente, que é uma fase sólida composta de organismos como plantas, bactérias e fungos, e uma fase líquida que geralmente é aquosa e contém íons metálicos (Rautela et al., 2023). O processo baseado na biossorção oferece muitas vantagens quando comparado aos métodos convencionais utilizados, tais como menor geração de efluentes, diminuição dos impactos ambientais e altas taxas de lixiviação, podendo atingir até 100% para Li e Co (Li et al., 2023).

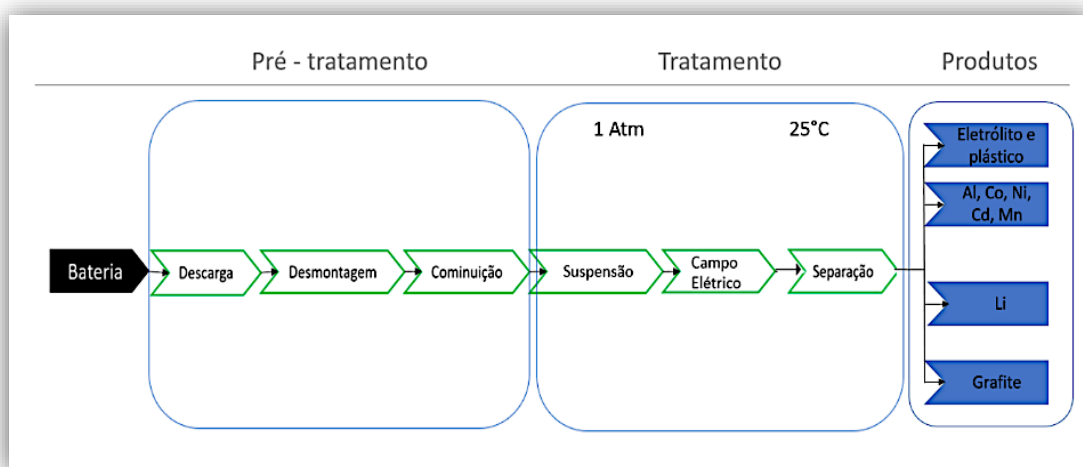
Entretanto, a biometalurgia enfrenta algumas limitações para aplicações em larga escala, como na indústria, as quais estão relacionadas aos largos ciclos de crescimento bacteriano e ao aumento dos encargos trabalhistas (Li et al., 2023).

5.3 CAMPO ELÉTRICO

A reciclagem por campo elétrico é uma tecnologia inovadora que utiliza campos elétricos de alta intensidade para separar e recuperar os materiais das LIBs (Lv et al., 2021). Uma das técnicas mais recentes é a lixiviação assistida por campo elétrico. Notavelmente, a adição de um campo elétrico ao sistema de lixiviação pode efetivamente evitar problemas relacionados à dificuldade de purificação dos licores de lixiviação, que foram encontrados após a substituição do H_2O_2 como agente redutor (Yang et al., 2023).

A Figura 6 mostra o processo de recuperação de Li por meio da aplicação de campo elétrico. Este processo se inicia com a etapa de pré-tratamento onde é feita a separação dos componentes. Em seguida, os materiais são triturados em partículas menores e misturados com um líquido condutor, como água ou etanol, para formar uma suspensão.

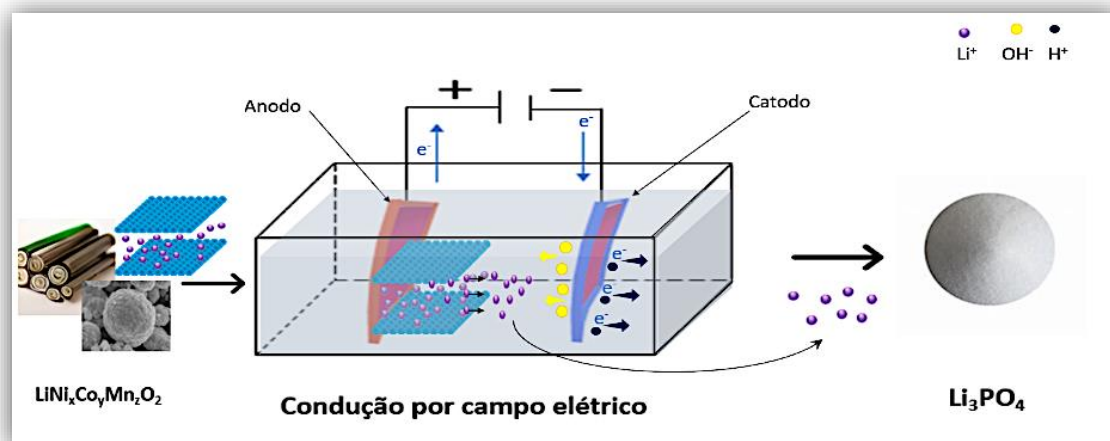
Figura 6. Processo de recuperação de Li por campo elétrico.



Fonte: Autores (2023).

No tratamento, essa suspensão é colocada em um recipiente, que é submetido a um campo elétrico de alta intensidade. O campo elétrico gera uma força eletrostática nas partículas carregadas na suspensão, fazendo com que elas se movam na direção oposta à do campo elétrico, processo conhecido como eletroforese. Durante o processo, os íons Li^+ intercalados nos materiais do eletrodo podem ser extraídos e dissolvidos em solução aquosa, que pode ser recuperado na forma de precipitado como Li_3PO_4 . Este processo pode ser observado na Figura 7, onde o Li das LIBs é transportado pelo campo elétrico na forma de Li^+ e em seguida é recuperado na forma de Li_3PO_4 .

Figura 7. Esquema da recuperação de Li por campo elétrico.



Fonte: Autores (2023).

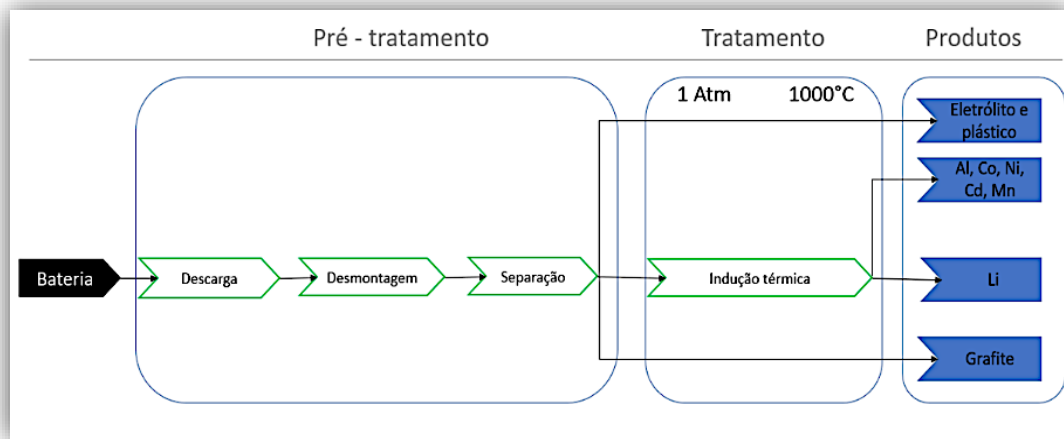
Os materiais com cargas elétricas diferentes tais como os ânodos e cátodos, podem ser separados e recuperados com alta eficiência através da utilização de diferentes intensidades de campo elétrico e frequências. O eletrólito, por sua vez, pode ser separado do restante da suspensão por sedimentação ou centrifugação e reciclado para uso posterior.

De acordo com Lv et al. (2021) esse processo pode alcançar eficiências de recuperação de até 95% para metais presentes nas LIBs, como Li, Co, Ni e Al. Essa alta eficiência pode ser atribuída à capacidade do campo elétrico de separar eletrostaticamente os diferentes componentes das baterias com base em suas propriedades elétricas. No entanto, é importante mencionar que esse processo tem um custo elevado. Além disso, o uso de soluções eletrolíticas e a aplicação de corrente elétrica requerem medidas de segurança adequadas devido aos potenciais riscos envolvidos.

5.4 INDUÇÃO TÉRMICA

A indução térmica tem se destacado como uma abordagem promissora para a reciclagem de LIBs. Esse processo baseia-se na aplicação de correntes de alta frequência a uma bobina de indução, gerando um campo magnético variável. Qualquer material ferromagnético e eletricamente condutor imerso em um campo eletromagnético alternado na faixa de frequência de kHz a MHz pode ser aquecido por indução (Kriston et al., 2020). O processo de indução térmica é semelhante ao processo pirometalúrgico. A primeira etapa do processo consiste na descarga e desmontagem das LIBs (Figura 8).

Figura 8. Processo de recuperação de lítio por indução térmica.



Fonte: Autores (2023).

Baseado no trabalho de Kriston et al. (2020) a etapa de tratamento, ocorre o processo de indução térmica, onde os componentes das LIBs são expostos ao campo magnético gerado pela corrente de alta frequência. As correntes de Foucault induzidas nas partículas condutoras resultam no aquecimento das mesmas, promovendo a decomposição e volatilização dos compostos orgânicos e na recuperação dos materiais inorgânicos. A indução térmica é aplicada diretamente nos componentes das LIBs, permitindo um aquecimento rápido e uniforme. O material ativo é então fundido usando a técnica de indução magnética, que utiliza um campo magnético oscilante para gerar calor nas partículas de metal e fundi-las. As impurezas presentes no material fundido são separadas e removidas.

A separação das impurezas presentes no material fundido durante o processo de indução térmica pode ser realizada por meio de diferentes métodos, dependendo das características específicas das impurezas e dos metais envolvidos. Esses métodos incluem a separação por densidade, a separação por dissolução, a separação eletromagnética e o refino eletrolítico. No método de separação por densidade, são exploradas as diferenças de densidade entre as impurezas e o metal fundido para separá-los. Isso pode ser feito por meio de processos como sedimentação, flotação ou centrifugação, aproveitando as variações de densidade para realizar a separação.

De acordo com Jin et al. (2022) na separação por dissolução, certos metais indesejados podem ser dissolvidos em solventes específicos, enquanto o metal principal permanece intacto. A escolha adequada do solvente é crucial e depende das propriedades químicas das impurezas e do metal que se deseja recuperar. Após a dissolução das impurezas, é possível realizar processos de precipitação ou cristalização para recuperar o metal puro. A separação eletromagnética utiliza campos magnéticos para separar partículas magnéticas das não magnéticas. Enquanto que o refino eletrolítico envolve a passagem do metal fundido por um processo eletrolítico, no qual uma corrente elétrica é aplicada. Isso resulta na dissolução seletiva das impurezas em soluções eletrolíticas e na deposição do metal puro em um cátodo. O refino eletrolítico é capaz de obter metais de alta pureza por meio da eletrólise seletiva das impurezas.

6 COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS

A seleção adequada do processo de reciclagem das LIBs deve levar em consideração os aspectos técnicos, econômicos e ambientais, buscando otimizar a eficiência de recuperação de materiais de alto valor agregado e reduzir os impactos ambientais associados à reciclagem. A Tabela 1 mostra as principais características dos processos vistos na Seção 5.

Os processos convencionais são amplamente utilizados na reciclagem das LIBs devido à infraestrutura já estabelecida, o que facilita a implementação desses processos em larga escala. No entanto, os processos convencionais apresentam limitações e impactos ambientais significativos, com visto na Tabela 1. A pirometalurgia, por exemplo, envolve a queima de materiais a altas temperaturas, o que pode resultar na geração de gases tóxicos e resíduos sólidos. A hidrometalurgia, por sua vez, utiliza soluções químicas para dissolver os metais das baterias, o que também pode gerar resíduos líquidos e demandar grandes quantidades de água.

Nesse contexto, é importante analisar os processos alternativos, como a reciclagem por campo elétrico, biometalurgia e indução térmica, e os benefícios que esses apresentam em relação aos compromissos globais, tais como a redução da geração de resíduos e menores impactos ambientais. No entanto, é importante ressaltar que a eficiência de recuperação desses processos alternativos ainda requer estudos adicionais para avaliar sua viabilidade econômica em comparação com as abordagens convencionais. Entretanto, cabe mencionar que o maior custo pode ser compensado pela maior eficiência de recuperação. Isso pode ser futuramente demonstrado por meio de uma análise econômica comparativa entre os processos convencionais e alternativos.

Tabela 1. Comparação entre os processos de recuperação das LIBs.

Processo de Reciclagem	Vantagens	Desvantagens	Eficiência de recuperação
Pirometalurgia	-Recuperação de metais alto valor agregado; -Tecnologia estabelecida.	-Alta emissão de gases; -Produção significativa de resíduos sólidos; -Consumo moderado de energia elétrica.	50-70% (Liu et al., 2019)
Hidrometalurgia	-Recuperação de grande variedade de materiais; -Redução das emissões de gases.	-Consumo moderado de energia elétrica; -Produção moderada de resíduos sólidos; -Alta produção de resíduos líquidos.	70-90% (Jin et al., 2022)
Indução Térmica	-Baixa emissão de gases; -Baixa geração de resíduos sólidos e líquidos	-Consumo elevado de energia elétrica; -Custo elevado dos equipamentos.	95% (Kriston et al., 2020)
Biometalurgia	-Baixa emissão de gases; -Baixa geração de resíduos sólidos e líquidos.	-Estágio de pesquisa e desenvolvimento.	>95% (Xin et al., 2016)
Processamento por Campo Elétrico	-Baixa emissão de gases; -Baixa geração de resíduos sólidos e líquidos.	-Estágio de pesquisa e desenvolvimento.	95% (Lv et al., 2021)

Fonte: Autores (2023).

Diante das legislações e acordos internacionais, há uma clara necessidade de desenvolver e aprimorar novas formas de reciclagem das LIBs, visando atender às metas de redução de emissões e promover a transição para uma economia verde e sustentável.

7 LEGISLAÇÃO

O Acordo de Paris, proposto na 21ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas em 2015, estabeleceu metas ambiciosas para a redução das emissões de gases de efeito estufa e a mitigação das mudanças climáticas (Pang et al., 2023; Salman et al., 2022; Feng et al., 2022). Como parte desses esforços, é esperado que as indústrias produtoras de LIBs buscassem formas sustentáveis de produção, incluindo a reciclagem adequada e a redução do uso de recursos naturais.

No âmbito da Organização das Nações Unidas (ONU), o Programa Ambiental das Nações Unidas (UNEP) também tem desempenhado um papel importante na promoção da gestão sustentável de resíduos e no estabelecimento de diretrizes para a reciclagem de baterias. O UNEP tem incentivado a adoção de práticas de economia circular, que visam maximizar o valor dos recursos e reduzir o desperdício, incluindo a reciclagem de baterias como parte desse processo.

A reciclagem de LIBs é uma prática regulamentada em muitos países em virtude de sua crescente importância na indústria e dos desafios ambientais associados ao seu descarte inadequado. Na União Europeia, a Diretiva de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) estabelece metas de recuperação e reciclagem para diferentes tipos de resíduos eletrônicos, incluindo baterias. Dentre essas diretivas, pode-se citar a Diretiva 2006/66/CE, a Diretiva 2012/19/UE e o Decreto-Lei n. 152-D/2017. A Diretiva 2006/66/CE e o Decreto-Lei n. 152-D/2017 estabelecem que não só é proibida a eliminação dos Resíduos de Baterias e Acumuladores (RBA) por deposição em aterro ou por incineração, como também se encontra definido o rendimento mínimo que os processos de reciclagem devem atingir (65%, em massa, dos RBA de Chumbo-ácido; 75%, em massa, dos RBA de Níquel-Cádmio e 50%, em massa, de outros RBA) (Valorcar, 2019).

No Brasil, a Lei 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, estabelece a responsabilidade compartilhada entre fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de baterias para a coleta e reciclagem desses produtos. Além disso, a Resolução CONAMA n. 401/2008 estabelece os limites máximos de chumbo, cádmio e mercúrio para pilhas e baterias comercializadas no território nacional.

Atualmente, no Brasil, o Decreto n. 11.413, de 13 de fevereiro de 2023 do Governo Federal institui o Certificado de Crédito de Reciclagem de Logística Reversa, o Certificado de Estruturação e Reciclagem de Embalagens em Geral e o Certificado de Crédito de Massa Futura, no âmbito dos sistemas de logística reversa de que trata o art. 33 da Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Com esse decreto, o Brasil pretende incentivar atividades produtivas, eficientes e sustentáveis, por meio da utilização de produtos e de embalagens com maior reciclabilidade e retornabilidade e conteúdo reciclado.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nesta breve revisão bibliográfica e documental pode-se constatar que a reciclagem alternativa tem eficiência de recuperação de íon Li e materiais agregados superior aos convencionais. Estes são tecnologias inovadoras e sustentáveis alinhadas às metas estabelecidas em acordos internacionais associadas as mudanças climáticas. Apesar disso, estudos em pequena escala de produção ainda limitam a reciclagem alternativa em aplicações comerciais. Com respeito aos convencionais, ainda há desafios a serem superados, como a otimização dos processos convencionais de reciclagem e a adoção de padrões internacionais de reciclagem. A participação ativa de fabricantes de baterias comprometidos com a sustentabilidade é essencial para o desenvolvimento de novas baterias fabricadas com materiais recicláveis. A atualização da legislação em vigor e a implementação de novos acordos internacionais mais rigorosos têm o potencial de exercer uma pressão imediata sobre o setor de energia, incentivando a adoção de práticas comerciais inovadoras e sustentáveis, alinhadas com os desafios das mudanças climáticas.

AGRADECIMENTOS

CAPES, FAPES e CNPQ.

REFERÊNCIAS

- Bhar, M., Bhattacharjee, U., Yalamanchili, K., & Martha, S. K. (2023). Effective upcycling of waste separator and boosting the electrochemical performance of recycled graphite anode for lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 580, 233403. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2023.233403>
- Dong, C., Dong, X., Jiang, Q., Dong, K., & Liu, G. (2018). What is the probability of achieving the carbon dioxide emission targets of the Paris Agreement? Evidence from the top ten emitters. *Science of The Total Environment*, 622-623, 1294-1303. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.12.093>
- Du, K., Ang, E. H., Wu, X., & Liu, Y. (2022). Progresses in Sustainable Recycling Technology of Spent Lithium-Ion Batteries. *Energy & Environmental Materials*, 5(4), 1012-1036. <https://doi.org/10.1002/EEM2.12271>
- Feng, C. C., Chang, K. F., Lin, J. X., Lee, T. C., & Lin, S. M. (2022). Toward green transition in the post Paris Agreement era: The case of Taiwan. *Energy Policy*, 165, 112996. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2022.112996>
- Golmohammadzadeh, R., Faraji, F., & Rashchi, F. (2018). Recovery of lithium and cobalt from spent lithium ion batteries (LIBs) using organic acids as leaching reagents: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 136, 418-435. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2018.04.024>
- Goodenough, J. B., & Park, K. S. (2013). The Li-ion rechargeable battery: A perspective. *Journal of the American Chemical Society*, 135(4), 1167-1176. https://doi.org/10.1021/JA3091438/ASSET/IMAGES/MEDIUM/JA-2012-091438_0009.GIF
- Horeh, N. B., Mousavi, S. M., & Shojaosadati, S. A. (2016). Bioleaching of valuable metals from spent lithium-ion mobile phone batteries using *Aspergillus niger*. *Journal of Power Sources*, 320, 257-266. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2016.04.104>
- IEA. (2023). Electric Vehicles.
- Jin, S., Mu, D., Lu, Z., Li, R., Liu, Z., Wang, Y., Tian, S., & Dai, C. (2022). A comprehensive review on the recycling of spent lithium-ion batteries: Urgent status and technology advances. *Journal of Cleaner Production*, 340, 130535. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.130535>
- Kader, Z. A., Marshall, A., & Kennedy, J. (2021). A review on sustainable recycling technologies for lithium-ion batteries. *Emergent Materials*, 4(3), 72-735. <https://doi.org/10.1007/S42247-021-00201-W/FIGURES/4>
- Kasprzak, W., Li, D., Patience, G. S., Sauriol, P., Amaris, H. V., Dolle, M., Gauthier, M., Rousselot, S., Talebi-Esfandarani, M., Bibienne, T., Sun, X., Liu, Y., & Liang, G. (2017). Using induction melting to make lithium-ion battery material. *Advanced Materials & Processes*, 175(8), 16-23.
- Khabbazan, M. M., & von Hirschhausen, C. (2021). The implication of the Paris targets for the Middle East through different cooperation options. *Energy Economics*, 104, 105629. <https://doi.org/10.1016/J.ENECO.2021.105629>
- Kim, S., Bang, J., Yoo, J., Shin, Y., Bae, J., Jeong, J., Kim, K., Dong, P., & Kwon, K. (2021). A comprehensive review on the pretreatment process in lithium-ion battery recycling. *Journal of Cleaner Production*, 294, 126329. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126329>
- Kriston, A., Kersys, A., Antonelli, A., Ripplinger, S., Holmstrom, S., Trischler, S., Döring, H., & Pfrang, A. (2020). Initiation of thermal runaway in Lithium-ion cells by inductive heating. *Journal of Power Sources*, 454, 227914.

- <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2020.227914>
Lai, X., Chen, Q., Tang, X., Zhou, Y., Gao, F., Guo, Y., Bhagat, R., & Zheng, Y. (2022). Critical review of life cycle assessment of lithium-ion batteries for electric vehicles: A lifespan perspective. *ETransportation*, 12, 100169.
- <https://doi.org/10.1016/J.ETRAN.2022.100169>
Leal, V. M., Ribeiro, J. S., Coelho, E. L. D., & Freitas, M. B. J. G. (2023). Recycling of spent lithium-ion batteries as a sustainable solution to obtain raw materials for different applications. *Journal of Energy Chemistry*, 79, 118-134.
- <https://doi.org/10.1016/J.JECHEM.2022.08.005>
Li, J., Li, L., Yang, R., & Jiao, J. (2023). Assessment of the lifecycle carbon emission and energy consumption of lithium-ion power batteries recycling: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Energy Storage*, 65, 107306.
- <https://doi.org/10.1016/J.EST.2023.107306>
Li, L., Zhang, X., Li, M., Chen, R., Wu, F., Amine, K., & Lu, J. (2018). The Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries: a Review of Current Processes and Technologies. *Electrochemical Energy Reviews* 2018 1(4), 461-482. <https://doi.org/10.1007/S41918-018-0012-1>
- Li, P., Luo, S., Zhang, L., Liu, Q., Wang, Y., Lin, Y., Xu, C., Guo, J., Cheali, P., & Xia, X. (2023). Progress, challenges, and prospects of spent lithium-ion batteries recycling: A review. *Journal of Energy Chemistry*.
- <https://doi.org/10.1016/J.JECHEM.2023.10.012>
Liao, X., Ye, M., Liang, J., Jian, J., Li, S., Gan, Q., Liu, Z., Mo, Z., Huang, Y., & Sun, S. (2023). Comprehensive insights into the gallic acid assisted bioleaching process for spent LIBs: Relationships among bacterial functional genes, Co(III) reduction and metal dissolution behavior. *Journal of Hazardous Materials*, 447, 130773.
- <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2023.130773>
Liu, C., Lin, J., Cao, H., Zhang, Y., & Sun, Z. (2019). Recycling of spent lithium-ion batteries in view of lithium recovery: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 228, 801-813.
- <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.04.304>
Lv, H., Huang, H., Huang, C., Gao, Q., Yang, Z., & Zhang, W. (2021). Electric field driven de-lithiation: A strategy towards comprehensive and efficient recycling of electrode materials from spent lithium ion batteries. *Applied Catalysis B: Environmental*, 283, 119634.
- <https://doi.org/10.1016/J.APCATB.2020.119634>
Magdalon, I. M. (2021). *Valorização das Baterias de Iões Lítio em Fim de Vida de Veículos Elétricos*. Instituto Politecnico de Leiria.
- Makuza, B., Tian, Q., Guo, X., Chattopadhyay, K., & Yu, D. (2021). Pyrometallurgical options for recycling spent lithium-ion batteries: A comprehensive review. *Journal of Power Sources*, 491, 229622.
- <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2021.229622>
Mantuano, D. P., Espinosa, D. C. R., Wolff, E., Mansur, M. B., & Schwabe, W. K. (2011). Pilhas e baterias portáteis: legislação, processos de reciclagem e perspectivas. *Brazilian Journal of Environmental Sciences (RBCIAMB)*, 21, 1–13.
- Mishra, G., Jha, R., Meshram, A., & Singh, K. K. (2022). A review on recycling of lithium-ion batteries to recover critical metals. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(6), 108534.
- <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2022.108534>
Moazzam, P., Boroumand, Y., Rabiei, P., Baghbaderani, S. S., Mokarian, P., Mohagheghian, F., Mohammed, L. J., & Razmjou, A. (2021). Lithium bioleaching: An emerging approach for the recovery of Li from spent lithium ion batteries. *Chemosphere*, 277, 130196.
- <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.130196>
Mossali, E., Picone, N., Gentilini, L., Rodríguez, O., Pérez, J. M., & Colledani, M. (2020). Lithium-ion batteries towards circular economy: A literature review of opportunities and issues of recycling treatments. *Journal of Environmental Management*, 264, 110500.
- <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2020.110500>
Pang, J., Liu, Z., Hou, W., & Tao, Y. (2023). How does the Paris Agreement affect firm productivity? International evidence. *Finance Research Letters*, 56, 104150. <https://doi.org/10.1016/J.FRL.2023.104150>
- Pinegar, H., & Smith, Y. R. (2019). Recycling of End-of-Life Lithium Ion Batteries, Part I: Commercial Processes. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 5(3), 402-416. <https://doi.org/10.1007/S40831-019-00235-9/FIGURES/8>
- Rautela, R., Yadav, B. R., & Kumar, S. (2023). A review on technologies for recovery of metals from waste lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 580, 233428.
- <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2023.233428>
Roy, J. J., Cao, B., & Madhavi, S. (2021). A review on the recycling of spent lithium-ion batteries (LIBs) by the bioleaching approach. *Chemosphere*, 282, 130944.
- <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.130944>
Roy, J. J., Madhavi, S., & Cao, B. (2021). Metal extraction from spent lithium-ion batteries (LIBs) at high pulp density by environmentally friendly bioleaching process. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124242.
- <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.124242>
S. Rangarajan, S., Sunddararaj, S. P., Sudhakar, A. V. V., Shiva, C. K., Subramaniam, U., Collins, E. R., & Senjyu, T. (2022). Lithium-Ion Batteries—The Crux of Electric Vehicles with Opportunities and Challenges.

- Clean Technologies*, 4(4), 908-930. <https://doi.org/10.3390/CLEANTECHNOL4040056>
- Salman, M., Long, X., Wang, G., & Zha, D. (2022). Paris climate agreement and global environmental efficiency: New evidence from fuzzy regression discontinuity design. *Energy Policy*, 168, 113128. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2022.113128>
- Silva, N. F. S. F., Ferreira, G. K., Reis, E. P., & Castro, D. E. (2019). A importância da reciclagem na sustentabilidade de carros elétricos. *Conexão Ciência (Online)*, 14(3), 9-18. <https://doi.org/10.24862/CCO.V14I3.1044>
- Singh, J. (2022). The Sustainability Potential of Upcycling. *Sustainability*, 14(10), 5989. <https://doi.org/10.3390/SU14105989>
- UNEP. (2023). *Electric Vehicle Lithium-ion Batteries in Lower- and Middle-income Countries*. UNEP - UN Environment Programme.
- USGS. (2023). *Mineral commodity summaries 2023*.
- Valorcar. (2019). *Guia de Gestão de Resíduos de Baterias e Acumuladores*.
- Velázquez-Martínez, O., Valio, J., Santasalo-Aarnio, A., Reuter, M., & Serna-Guerrero, R. (2019). A Critical Review of Lithium-Ion Battery Recycling Processes from a Circular Economy Perspective. *Batteries*, 5(4), 68. <https://doi.org/10.3390/BATTERIES5040068>
- Wei, G., Liu, Y., Jiao, B., Chang, N., Wu, M., Liu, G., Lin, X., Weng, X. F., Chen, J., Zhang, L., Zhu, C., Wang, G., Xu, P., Di, J., & Li, Q. (2023). Direct recycling of spent Li-ion batteries: Challenges and opportunities toward practical applications. *IScience*, 26(9), 107676. <https://doi.org/10.1016/J.ISCI.2023.107676>
- Xin, Y., Guo, X., Chen, S., Wang, J., Wu, F., & Xin, B. (2016). Bioleaching of valuable metals Li, Co, Ni and Mn from spent electric vehicle Li-ion batteries for the purpose of recovery. *Journal of Cleaner Production*, 116, 249-258. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.01.001>
- Yang, K., Zhu, C., Li, J., Meng, B., Zhong, K., Huang, W., Yu, J., & Fang, Z. (2023). Electric field-assisted leaching of valuable metals from spent lithium-ion batteries in a mixture of acetic acid and ascorbic acid. *Hydrometallurgy*, 221, 106152. <https://doi.org/10.1016/J.HYDROMET.2023.106152>
- Yu, W., Guo, Y., Xu, S., Yang, Y., Zhao, Y., & Zhang, J. (2023). Comprehensive recycling of lithium-ion batteries: Fundamentals, pretreatment, and perspectives. *Energy Storage Materials*, 54, 172-220. <https://doi.org/10.1016/J.ENSM.2022.10.033>
- Zhang, G., Yuan, X., Tay, C. Y., He, Y., Wang, H., & Duan, C. (2023). Selective recycling of lithium from spent lithium-ion batteries by carbothermal reduction combined with multistage leaching. *Separation and Purification Technology*, 314, 123555. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2023.123555>
- Zhang, N., Xu, Z., Deng, W., & Wang, X. (2022). Recycling and Upcycling Spent LIB Cathodes: A Comprehensive Review. *Electrochemical Energy Reviews*, 5(1), 1-38. <https://doi.org/10.1007/S41918-022-00154-6>