

Recycling electric vehicle batteries to promote a circular economy

Reciclagem de baterias de veículos elétricos para promover a economia circular

Gabriel Simplício Lopes
Geraldo Cardoso de Oliveira Neto
Sergio Ricardo Lourenço
Universidade Federal do ABC

ABSTRACT

Due to the need to reduce pollutant emissions, there has been a significant increase in the production of electric vehicles (EVs) in recent years. Consequently, there is an exponential increase in the use of batteries for electric vehicles, leading to significant environmental challenges. Although the literature presents much information on recycling methods and processes for electric vehicle batteries, there is still a gap in the development of recycling procedures for electric vehicle batteries to promote a circular economy. Thus, this work aims to conduct a bibliometric review to map the state of the art of the research field in question, identify trends, knowledge gaps, and relationships between different authors, journals, and areas of study. Therefore, in this work, the bibliometric review method will be applied using the PRISMA methodology. Thus, by applying the PRISMA methodology, it will be possible to identify trends and knowledge gaps.

RESUMO

Devido à necessidade de reduzir as emissões de poluentes, obtém-se um aumento significativo da produção de veículos elétricos (VE) nos últimos anos. Consequentemente, há um aumento exponencial na utilização de baterias para veículos elétricos acarretando desafios ambientais significativos. Embora a literatura apresente muitas informações sobre os métodos e processos de reciclagem para baterias de veículos elétricos, ainda há uma lacuna no desenvolvimento dos procedimentos de reciclagem de baterias de veículos elétricos para promover a economia circular. Assim, este trabalho tem como o objetivo de realizar uma revisão bibliométrica para mapear o estado da arte do campo de pesquisa em questão, identificar tendências, lacunas de conhecimento e relações entre diferentes autores, periódicos e áreas de estudo. Então, nesse trabalho, será aplicado o método de revisão bibliométrica por meio da metodologia PRISMA. Assim, aplicando a metodologia PRISMA será possível identificar tendências e lacunas de conhecimento.

INTRODUÇÃO

Devido ao aumento de veículos elétricos (VE) nos últimos anos, a indústria automotiva vem passando por uma transformação significativa, pois há uma grande necessidade de reduzir as emissões de poluentes e de direcionar o uso de fontes de energia mais sustentável. Por isso, as baterias de íon-lítio, componentes essenciais para os VEs, têm experimentado um aumento considerável em sua produção e utilização. Entretanto, o aumento exponencial da utilização de baterias apresenta desafios ambientais significativos, quando é tratado sobre o descarte e reciclagem das baterias no fim da sua vida útil [10].

Reciclar baterias de veículos elétricos é um assunto complexo que envolve diversos aspectos técnicos, ambientais e econômicos. Essas baterias possuem uma quantidade de materiais preciosos, como lítio, cobalto, níquel, manganês entre outros. Assim, a recuperação é fundamental para diminuir os impactos ambientais e para garantir a sustentabilidade desses recursos. Ademais, a existência de alguns materiais nocivos nas baterias pode se tornar riscos de saúde pública e ao meio-ambiente se não forem descartados da maneira correta [9].

Nos últimos anos, as tecnologias para realizar a reciclagem de baterias de veículos elétricos têm se desenvolvido em diferentes processos como hidrometalurgia, pirometalurgia e processos de reciclagem direta. Muitas organizações de reciclagem utilizam esses processos com o objetivo de aumentar a qualidade e quantidade da reciclagem dos materiais que são recuperados [2]. Para corroborar a isto, existem muitas perspectivas para reciclagem baterias de veículos elétricos que são abordadas na literatura [8]. Geralmente, o propósito principal é reciclar os componentes preciosos das baterias, especialmente os ativos de ânodo e no cátodo através de processos de pirometalurgia e hidrometalurgia. Além dos processos de mencionados, existem outras opções à reciclagem, tendo como exemplo, os sistemas de armazenamento de energia

estacionários, sendo uma aplicação de segunda vida para destinar a bateria [8].

Apesar das pesquisas existentes e artigos publicados sobre os procedimentos de reciclagem para baterias de veículos elétricos, ainda há uma lacuna no desenvolvimento dos procedimentos de reciclagem de baterias de veículos elétricos para promover a economia circular.

Portanto, este estudo tem como objetivo de realizar uma revisão bibliométrica para mapear o estado da arte do campo de pesquisa em questão, identificar tendências, lacunas de conhecimento e relações entre diferentes autores, periódicos e áreas de estudo. Assim, será possível propor e sugerir estudos futuros para cada indicador.

METODOLOGIA

O processo adotado na metodologia de pesquisa foi a Revisão Sistemática da Literatura, como uma etapa inicial para a construção deste trabalho, empregando a metodologia PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), possibilitando desta maneira uma busca sobre o tema, analisando estudos já publicados para defender a lacuna de pesquisa [4].

Prosseguindo com o uso da metodologia PRISMA, foram as perguntas de pesquisa, sendo que, a pergunta de pesquisa precisa ser criada de maneira que o problema seja questionado especificamente com clareza.

Em seguida, foi escolhido a base de dados que seria usada para executar a buscas dos artigos. Com isso, a base escolhida foi o Scopus. O Scopus contém diversos periódicos, sendo de extrema relevância para o trabalho em questão.

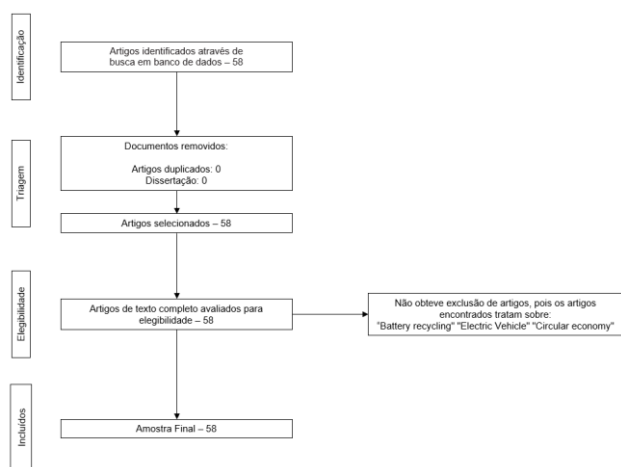


Figura 1. Seleção e avaliação das pesquisas. Fonte: Elaborado pelos autores.

Após a escolha da base de dados, foram desenvolvidos os grupos de palavras-chave associados aos métodos de reciclagem de baterias de veículos elétricos: (i) "Battery recycling"; (ii) "Electric Vehicle"; (iii) "Circular economy". As três expressões de palavras-chave foram colocadas no

Scopus e obteve um total de 58 artigos. Dentre esses 58 artigos, temos artigos de revistas e foi considerado também artigos de congresso.

Assim, se obteve uma amostra final definida pela quantidade de artigo, após a aplicação da Metodologia PRISMA. Com isso, foi realizada uma revisão bibliométrica, a qual, é definida como "um conjunto de métodos matemáticos e estatísticos aplicados ao estudo da produção, disseminação e uso da informação registrada em documentos" [1]. Essa abordagem quantitativa permitiu mapear o estado da arte de um campo de pesquisa, identificar tendências, lacunas de conhecimento e relações entre diferentes autores, periódicos e áreas de estudo.

REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

A análise bibliométrica, é definida como "um conjunto de métodos matemáticos e estatísticos aplicados ao estudo da produção, disseminação e uso da informação registrada em documentos" [1]. Essa abordagem quantitativa permite mapear o estado da arte de um campo de pesquisa, identificar tendências, lacunas de conhecimento e relações entre diferentes autores, periódicos e áreas de estudo. No contexto da presente dissertação, a análise bibliométrica será fundamental para investigar a produção científica relacionada à reciclagem de baterias de veículos elétricos, fornecendo insights valiosos para o desenvolvimento dos procedimentos de reciclagem de baterias de veículos elétricos para promover a economia circular.

A figura 2 de "Número de artigos publicados em cada ano" apresenta um aumento significativo na produção científica tratando do tema desse trabalho (reciclagem de baterias de veículos elétricos para promover a economia circular) ao longo do período de 2014 a 2024. O gráfico também retrata crescimento exponencial a partir de 2018, com um aumento acentuado no número de artigos publicados anualmente, atingindo um pico em 2022.

Esse crescimento sugere um aumento significativo no interesse da comunidade científica pelo tema da reciclagem de baterias de veículos elétricos. Isso pode estar relacionado a diversos fatores, como:

- O crescimento da indústria de veículos elétricos e a consequente necessidade de soluções sustentáveis para o descarte de baterias;
- Avanços tecnológicos na área de reciclagem, tornando o processo mais eficiente e economicamente viável;
- Maior conscientização sobre os impactos ambientais das baterias e a importância da economia circular.

O pico de publicações em 2022 pode indicar um momento de grande efervescência na pesquisa, possivelmente impulsionado por eventos específicos, como conferências, investimentos em pesquisa ou novas descobertas. Já a queda em 2023 pode ser atribuída a fatores, como por exemplo as flutuações naturais na produção científica ou os impactos da pandemia de COVID-19 em projetos de pesquisa.

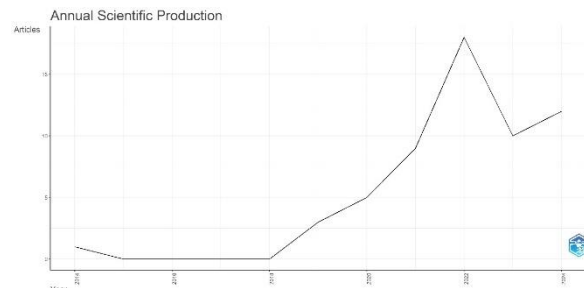


Figura 2: Número de artigos publicados em cada ano. Fonte: Elaborado pelos autores.

A figura 3 destaca os artigos científicos que receberam o maior número de citações em sua base de dados, indicando sua influência e relevância no campo da reciclagem de baterias de veículos elétricos.

O artigo de Makuza B, publicado em 2021 no periódico "J POWER SOURCES", atingiu o número de 446 citações. Esse trabalho forneceu uma visão geral abrangente do status atual das opções pirometalúrgicas para reciclagem de LIBs usada, destacando a importância de considerar o impacto ambiental dos diferentes métodos de reciclagem. Outra informação que teve destaque no gráfico 2 foi que o artigo com mais citações alcançou aproximadamente 40% a mais do segundo colocado.

Além de Makuza B, outros artigos também se destacam pelo elevado número de citações, como:

- Velazquez-Martinez et al. (2019) com 318 citações;
- Neumann et al. (2022) com 312 citações;
- Thompson et al. (2020) com 218 citações;

Esses trabalhos, juntamente com outros presentes no gráfico, formam um conjunto de referências essenciais para a compreensão do estado da arte da pesquisa sobre os métodos de reciclagem de baterias de veículos elétricos.

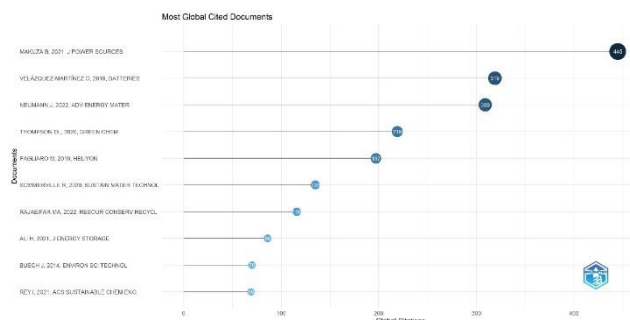


Figura 3: Documentos mais citados globalmente. Fonte: Elaborado pelos autores.

O gráfico "Fontes Mais Relevantes" evidencia as fontes de publicação que mais contribuíram para a base de dados analisada, indicando sua importância no campo de pesquisa, com um destaque para o "Journal of Cleaner Production" e "Resources, Conservation and Recycling".

Isto demonstra a relevância do "Journal of Cleaner Production" e "Resources, Conservation and Recycling", cada um com 4 documentos publicados na base de dados. Isto retrata o quão esses periódicos são canais importantes para a disseminação de pesquisas sobre o tema em estudo, atraindo autores de destaque e publicando trabalhos de alta qualidade e impacto.

A análise das fontes mais relevantes apresenta as tendências importantes nas publicações de pesquisas sobre reciclagem de baterias de veículos elétricos. Verifica-se uma predominância de periódicos com foco em sustentabilidade e meio ambiente, como o "Journal of Cleaner Production" e "Resources, Conservation and Recycling". Essa tendência destaca a crescente preocupação com os impactos ambientais das baterias e a necessidade de desenvolver soluções de reciclagem eficientes e ecologicamente corretas.

Além disso, a presença de periódicos como "Applied Energy" e "ACS Sustainable Chemistry & Engineering" indica a importância da interdisciplinaridade na pesquisa em reciclagem de baterias, envolvendo áreas como química, engenharia e energia. Essa diversidade de fontes reflete a complexidade do tema e a necessidade de abordagens multifacetadas para o desenvolvimento de soluções eficazes.

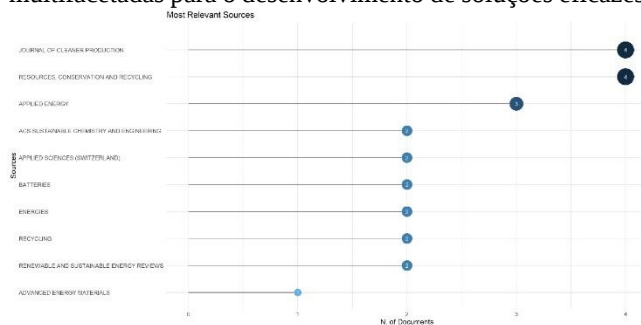


Figura 4: Fontes mais relevantes. Fonte: Elaborado pelos autores.

A figura 5 realiza a análise da produção científica por país revela a existência de polos de pesquisa de destaque em reciclagem de baterias de veículos elétricos. O Reino Unido lidera a produção com 34 documentos publicados, indicando um forte investimento em pesquisa e desenvolvimento nessa área. A China, com 24 documentos, também se destaca como um importante centro de pesquisa, impulsionada pelo crescimento da indústria de veículos elétricos e pela busca por soluções sustentáveis. Outros países como Alemanha, Estados Unidos, Espanha e Índia também demonstram contribuições significativas, evidenciando a relevância global do tema.

A distribuição geográfica da produção científica reflete diferentes contextos e desafios em relação à reciclagem de baterias. A liderança do Reino Unido pode estar associada a políticas públicas de incentivo à sustentabilidade e à economia circular, enquanto a forte presença da China pode ser explicada pelo rápido crescimento do mercado de veículos elétricos no país e pela necessidade de lidar com o grande volume de baterias em fim de vida. A participação de outros países, como Alemanha, Estados Unidos, Espanha e Índia, demonstra a importância global da pesquisa em reciclagem de baterias e a busca por soluções eficientes e ecologicamente corretas em diferentes contextos.

No contexto global, o Brasil ainda apresenta uma produção científica modesta em reciclagem de baterias de veículos elétricos, com 3 documentos publicados. Essa realidade aponta para a necessidade de ampliar os investimentos em pesquisa e desenvolvimento nessa área estratégica para a sustentabilidade do país. O crescimento do mercado de veículos elétricos no Brasil demanda o desenvolvimento de soluções locais para a reciclagem de baterias, considerando as particularidades do país e as oportunidades de inovação. A análise bibliométrica evidencia a importância de fortalecer a pesquisa brasileira em reciclagem de baterias, buscando colaborações internacionais e investindo em projetos que gerem conhecimento e tecnologias para o setor.

Country Scientific Production

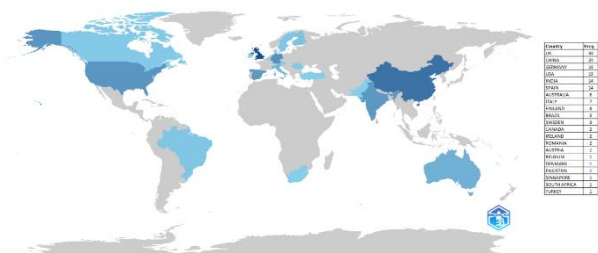


Figura 5: Produção Científica por país. Fonte: Elaborado pelos autores.

A nuvem de palavras (figura 6) apresentada oferece uma representação visual dos termos mais frequentes e relevantes identificados na base de dados analisada, revelando os principais temas e conceitos que permeiam a pesquisa sobre reciclagem de baterias de veículos elétricos.

O termo "battery recycling" destaca-se como o mais proeminente, evidenciando a centralidade desse tema na literatura. A ênfase em "lithium-ion batteries" ressalta o tipo de bateria mais utilizado em veículos elétricos e, consequentemente, o foco principal das pesquisas em reciclagem. A presença de termos como "recycling process", "end of life" e "spent lithium-ion batteries" reforça a preocupação com o destino das baterias após seu uso, buscando soluções para o seu reaproveitamento e minimização dos impactos ambientais.

A nuvem de palavras também evidencia a forte conexão entre a reciclagem de baterias e a busca por um futuro mais sustentável. Termos como "circular economy", "sustainable development" e "environmental impact" demonstram a importância da reciclagem para a redução do consumo de recursos naturais, a diminuição da geração de resíduos e a mitigação dos impactos ambientais associados à produção e descarte de baterias.



Figura 6: Nuvem de palavras. Fonte elaborado pelos autores.

A figura 7 "Setor" revela a distribuição dos artigos da base de dados entre diferentes áreas do conhecimento, evidenciando a multidisciplinaridade da pesquisa em reciclagem de baterias de veículos elétricos.

O gráfico destaca a "Engenharia Química" e "Sustentabilidade" como os setores com maior número de publicações, indicando sua importância central na pesquisa sobre reciclagem de baterias. A Engenharia Química contribui com o desenvolvimento de processos e tecnologias para a recuperação de materiais valiosos das baterias, enquanto a Sustentabilidade aborda os impactos ambientais e a viabilidade econômica da reciclagem, buscando soluções que promovam a economia circular. Também é destacado em terceiro lugar e setor da Economia Circular que envolve o estudo dos aspectos econômicos e ambientais da reciclagem de baterias, buscando modelos de negócio sustentáveis e políticas públicas que promovam a economia circular.

Com a diversidade de setores representados no gráfico demonstra a natureza complexa e multifacetada da pesquisa em reciclagem de baterias de veículos elétricos. Essa interdisciplinaridade exige a colaboração entre diferentes áreas do conhecimento para o desenvolvimento de soluções eficazes e abrangentes. A análise dos setores de pesquisa

reforça a importância de considerar diferentes perspectivas e abordagens dos estudos sobre os métodos de reciclagem de baterias para veículos elétricos. A integração de conhecimentos de áreas como engenharia química, sustentabilidade, engenharia de materiais e economia circular é fundamental para desenvolver uma solução completa e eficaz para o problema do descarte de baterias.

A análise dos setores de pesquisa, portanto, não apenas mapeia a distribuição do conhecimento na área, mas também destaca a necessidade de colaboração interdisciplinar e a importância de considerar diferentes perspectivas para o desenvolvimento de soluções inovadoras e sustentáveis para a reciclagem de baterias de veículos elétricos.

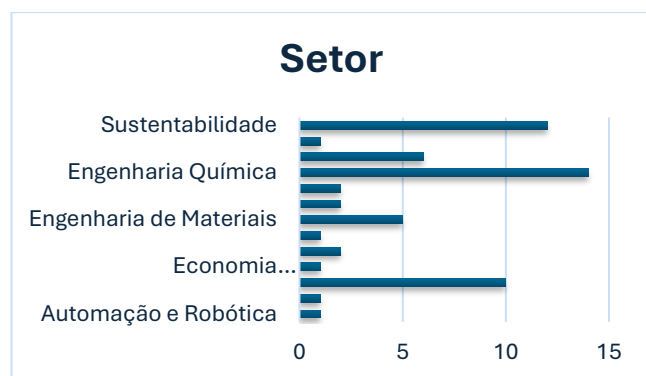


Figura 7: Setor. Fonte: Elaborado pelos autores.

No gráfico "Metodologia dos artigos" oferece uma visão clara das abordagens metodológicas empregadas nos estudos sobre reciclagem de baterias de veículos elétricos presentes na base de dados analisada.

Também é destacado a "Revisão" e a "Modelagem matemática" como as metodologias mais frequentes, representando 23 e 25 artigos, respectivamente. Essa predominância sugere que grande parte da pesquisa na área se concentra na síntese e análise crítica do conhecimento existente (revisões) e no desenvolvimento de modelos teóricos e matemáticos para representar e prever o comportamento de sistemas e processos relacionados à reciclagem de baterias.

Em contraste, abordagens como "Experimental" e "Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)" apresentam menor representatividade, com 5 e 1 artigos, respectivamente. Isso indica que, embora importantes, estudos práticos e análises abrangentes do ciclo de vida ainda são menos frequentes na literatura sobre reciclagem de baterias de veículos elétricos.

A análise das metodologias dos artigos revela a importância de diferentes abordagens para o avanço da pesquisa em reciclagem de baterias. Revisões e modelagem matemática fornecem a base teórica e o conhecimento fundamental sobre o tema, enquanto estudos experimentais e ACV contribuem com dados empíricos e avaliações abrangentes dos impactos ambientais.

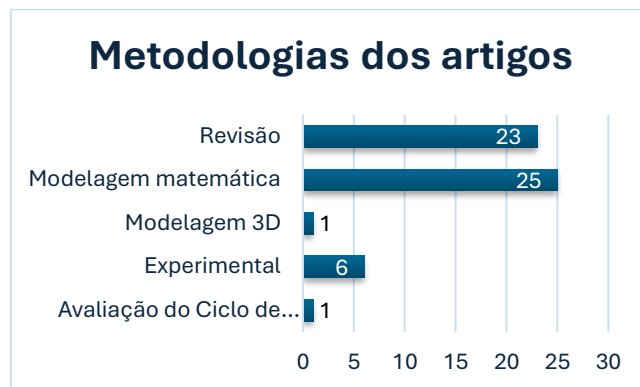


Figura 8: Metodologia dos artigos. Fonte: Elaborado pelos autores.

CONCLUSÃO

Portanto, por meio desse estudo que teve como objetivo de realizar uma revisão bibliométrica para mapear o estado da arte, tratando sobre os procedimentos de reciclagem de baterias de veículos elétricos para promover a economia circular, identificou tendências e lacunas de conhecimento que propõe as seguintes recomendações e sugestões para estudos futuros.

Nos resultados obtidos na Figura 2, foi apresentado uma queda posterior ao ano de 2022 (momento do pico). Assim, é evidenciado a necessidade de uma efervescência e crescimento nas pesquisas que contribuem para os processos de reciclagem. As operações como hidrometalurgia e pirometalurgia carecem de melhoria em seus processos para aumentar a eficiência de reciclagem em larga escala.

Além disso, os valores que foram apresentados na Figura 3, mostram os artigos que foram mais citados globalmente. As citações mostram três artigos que se destacaram dentre os demais. Com isso, pode-se colocar que estudos com um maior impacto e alta relevância são necessários para contribuir com a literatura e o avanço da ciência no tema em questão.

Nos resultados encontrados a partir da Figura 5, é evidenciado a produção científica por país, a partir da pesquisa feita no tema do trabalho em questão. Nessa figura, nota-se a baixa produção científica do Brasil e sua respectiva necessidade por investimentos e subsídios que corroboram com o avanço do conhecimento. O Brasil, com suas dimensões continentais, ainda precisa de avanços na área de reciclagem de baterias, para assim conseguir reduzir consideravelmente a extração de minérios para produção de novas baterias.

Na nuvem de palavras elaborada como a Figura 6, é apresentado a representação visual dos termos mais frequentes e relevantes na base de dados desse trabalho. Embora o termo "Circular Economy" mostra a sua importância na base de dados, se faz necessários mais estudos e trabalhos que possuem o foco de promover a economia circular. Nesse contexto, a economia circular

contribui para a recuperação dos materiais valiosos, diminuindo a extração de novas matérias-primas e minimizando o impacto ambiental. Esses princípios devem ser a grande motivação dos trabalhos dentro da área.

As Figuras 7 e 8 apresentam respectivamente, o setor e as metodologias aplicadas nos trabalhos que estão na base de dados deste trabalho. Na imagem que reflete as metodologias, é apresentado uma grande necessidade de trabalhos de caráter experimental e de avaliação do ciclo de vida. Pois preenchendo as lacunas que ainda existem o avanço do conhecimento ocorrerá.

REFERÊNCIAS

- [1] Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 15287: Projeto de pesquisa. Rio de Janeiro, 2011.
- [2] COLLIS, G. E.; DAI, Q.; LOH, J. S. C.; LIPSON, A.; GAINES, L.; ZHAO, Y.; SPANGENBERGER, J. Closing the Loop on LIB Waste: A Comparison of the Current Challenges and Opportunities for the U.S. and Australia towards a Sustainable Energy Future. *Recycling*, v. 8, n. 5, p. 78, 2023. DOI: [10.3390/recycling8050078](https://doi.org/10.3390/recycling8050078).
- [3] MAKUSA, B.; TIAN, Q.; GUO, X.; CHATTOPADHYAY, K.; YU, D. Pyrometallurgical Options for Recycling Spent Lithium-Ion Batteries: A Comprehensive Review. *Journal of Power Sources*, v. 491, p. 229622, 2021. DOI: [10.1016/j.jpowsour.2021.229622](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229622).
- [4] MOHER, D.; LIBERATI, A.; TETZLAFF, J.; ALTMAN, D. G. Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *PLoS Medicine*, v. 6, n. 7, p. e1000097, 2009. DOI: [10.1371/journal.pmed.1000097](https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097).
- [5] NEUMANN, J.; PETRANIKOVA, M.; MEEUS, M.; GAMARRA, J. D.; YOUNESI, R.; WINTER, M.; NOWAK, S. Recycling of Lithium-Ion Batteries—Current State of the Art, Circular Economy, and Next Generation Recycling. *Advanced Energy Materials*, v. 12, n. 17, p. 2102917, 2022. DOI: [10.1002/aenm.202102917](https://doi.org/10.1002/aenm.202102917).
- [6] THOMPSON, D. L.; HARTLEY, J. M.; LAMBERT, S. M.; SHIREF, M.; HARPER, G. D. J.; KENDRICK, E.; ANDERSON, P.; RYDER, K. S.; GAINES, L.; ABBOTT, A. P. The importance of design in lithium ion battery recycling – a critical review. *Green Chemistry*, v. 22, n. 22, p. 7585-7603, 2020. DOI: [10.1039/d0gc02745f](https://doi.org/10.1039/d0gc02745f).
- [7] VELÁZQUEZ-MARTÍNEZ, O.; VALIO, J.; SANTASALO-AARNIO, A.; REUTER, M.; SERNA-GUERRERO, R. A Critical Review of Lithium-Ion Battery Recycling Processes from a Circular Economy Perspective. *Batteries*, v. 5, n. 4, p. 68, 2019. DOI: [10.3390/batteries5040068](https://doi.org/10.3390/batteries5040068).
- [8] WOESTE, R.; DRUDE, E.-S.; VRUCAK, D.; KLÖCKNER, K.; ROMBACH, E.; LETMATHE, P.; FRIEDRICH, B. A techno-economic assessment of two recycling processes for black mass from end-of-life lithium-ion batteries. *Applied Energy*, v. 361, p. 122921, 2024. DOI: [10.1016/j.apenergy.2024.122921](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122921).
- [9] ZENG, Xianlai; LI, Jinhui; SINGH, Narendra. Recycling of spent lithium-ion battery: A critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, Beijing, v. 44, n. 10, p. 1129-1165, 2014. <https://doi.org/10.1080/10643389.2013.763578>.
- [10] ZHANG, Fengyuan. Reverse logistics network design and optimization for battery recycling of waste electric vehicle based on circular economy. In: *International Conference on Smart Transportation and City Engineering (STCE 2023)*, 2023, Shanghai. Anais... Shanghai: SPIE, 2024. p. 1301849. <https://doi.org/10.1117/12.3024>.