

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta Dissertação será disponibilizado somente a partir de 01/07/2024.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

ANA MARIELE DOMINGUES

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE CENÁRIOS PARA RECICLAGEM DE
BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO NO BRASIL**

BAURU

2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

ANA MARIELE DOMINGUES

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE CENÁRIOS PARA RECICLAGEM DE
BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO NO BRASIL**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Faculdade de Engenharia - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, campus de Bauru, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Gestão de Sistemas Produtivos.

Linha de pesquisa: Sustentabilidade e Sistemas Produtivos.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Gabbay de Souza.

BAURU

2022

D671a

Domingues, Ana Mariele

Avaliação do Ciclo de Vida de cenários para reciclagem de baterias de íons de lítio no Brasil / Ana Mariele Domingues. -- Bauru, 2021
172 p. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Engenharia, Bauru

Orientador: Ricardo Gabbay de Souza

1. Engenharia de Produção. 2. Reciclagem. 3. Avaliação do Ciclo
de Vida. 4. Avaliação de Impactos Ambientais. 5. Gestão de resíduos.

I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de
Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE ANA MARIELE DOMINGUES, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 01 dias do mês de julho do ano de 2022, às 09:15 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de ANA MARIELE DOMINGUES, intitulada **AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE CENÁRIOS PARA RECICLAGEM DE BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO NO BRASIL**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. RICARDO GABBAY DE SOUZA (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / Instituto de Ciencia e Tecnologia Campus de Sao Jose dos Campos UNESP, Prof. Dr. ALDO ROBERTO OMETTO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Escola de Engenharia - USP - São Carlos/SP, Prof. Dr. SANDRO DONNINI MANCINI (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / Instituto de Ciencia e Tecnologia Campus de Sorocaba Unesp. Após a exposição pela mestrande e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: APROVADA _ _ _ _ _ . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. RICARDO GABBAY DE SOUZA

*Para Nino.
Pelo amor e apoio incondicional em todos os
momentos. Você faz do mundo um lugar
melhor.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao bom Deus pela dádiva da vida e inspirações durante a execução deste trabalho e em todos os minutos da minha existência.

Ao meu orientador, Ricardo Gabbay de Souza, pelos valiosos ensinamentos, apoio, paciência e generosidade com seu tempo, dedicando incontáveis horas para esclarecer minhas dúvidas sobre a pesquisa.

Aos Professores da banca de qualificação e defesa, Aldo Roberto Ometto e Sandro Donnini Mancini, pela generosidade com seu tempo e conhecimento, fornecendo valiosas contribuições para a melhoria e evolução geral do trabalho.

Aos parceiros de pesquisa do CTI, Marisa Franzoni, Flavia Padoan e Jose Rocha de Andrade, pela disponibilidade e contribuições para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Professor Henrique Leonardo Maranduba pelos ensinamentos sobre o *software* de modelagem, ajuda nos procedimentos técnicos e generosidade com seu tempo e recursos.

A todos os meus colegas do Programa de Pós-Graduação, pelo carinho e acolhimento desde o primeiro dia como aluna especial em 2018, pelas trocas de conhecimento no desenvolvimento de trabalhos e artigos, inúmeros auxílios e palavras de ânimo nos momentos mais desafiadores.

A Milena Barros da Cunha pela parceria nos estudos teóricos, modelagem e desenvolvimento de trabalhos sobre ACV.

Ao meu companheiro de vida, Airton (Nino). Obrigado por tornar tudo mais fácil para mim, pelo suporte emocional e material, pelas palavras de ânimo, amor e encorajamento em todas as horas. Obrigada por renunciar a tantas coisas para que eu pudesse realizar mais esse sonho.

A minha família pelo apoio incondicional em todas as horas, pela compreensão nos momentos de ausência e por acreditarem em mim e em todos os meus sonhos.

Aos funcionários da Seção Técnica da Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia, especialmente ao Gustavo e a Alessandra, por toda a ajuda e paciência em sanar dúvidas sobre os procedimentos.

Aos Professores da Pós-Graduação pelos valiosos ensinamentos. Todos, com os quais tive a honra de ter aulas e conviver, contribuíram de alguma forma com este trabalho e me inspiraram a continuar no caminho da pesquisa e docência.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro durante a pesquisa.

RESUMO

Previsões indicam que haverá um aumento exponencial na geração de resíduos de baterias de íons de lítio (LIBs) a partir de 2030, impulsionado pelo aumento da demanda para aplicações em eletrônicos de consumo, veículos elétricos e armazenamento de energia renovável. A reciclagem de materiais das LIBs gastas tem sido apontada uma das soluções para reduzir a pressão sobre os recursos naturais da demanda crescente por metais, para a produção do material ativo das baterias, e da disposição em aterros. No entanto, os impactos ambientais dos processos de reciclagem aplicáveis às LIBs ainda são pouco conhecidos e estudados. Os estudos disponíveis sobre impactos ambientais da reciclagem de LIBs estão focados em países desenvolvidos e priorizam a reciclagem de LIBs presentes em veículos elétricos. Entretanto, no fluxo de resíduos eletroeletrônicos (REEE) uma quantidade significativa de LIBs pode ser encontrada, pois cada aparelho portátil possui acoplado uma bateria recarregável. Apesar do alto volume de LIBs no fluxo de REEE, são escassos estudos que investiguem os impactos e benefícios da gestão e reciclagem de LIBs presentes neste fluxo. O objetivo deste trabalho foi avaliar os potenciais impactos ambientais de quatro cenários para a reciclagem de LIBs provenientes de *Smartphones* e *Notebooks*, no contexto brasileiro. A avaliação considera parâmetros como geração anual de resíduos, taxa de coleta e destino dos resíduos coletados. A avaliação foi conduzida por meio da Avaliação do Ciclo de Vida. O cenário avaliado com melhor desempenho prioriza a reciclagem no Brasil e a redução da quantidade de resíduos de LIBs enviados para aterros sanitários. O Cenário 4 apresenta o melhor desempenho, com o aumento da coleta pela Logística Reversa (LR) para 50% dos resíduos gerados e redução da taxa de aterro em 44,4%, 13 categorias de impacto ambiental apresentam benefícios líquidos. Os resultados indicam que benefícios ambientais mais significativos são alcançados quando a taxa de coleta pela LR é aumentada e a recuperação de materiais é feita pela opção de tecnologia menos impactante. A reciclagem das LIBs presentes nos fluxos de REEE tem potencial para gerar benefícios ambientais, sociais e econômicos para o Brasil, pois mitiga a poluição da extração de recursos naturais não renováveis e descarte inadequado, pode gerar empregos, renda e oportunidades de desenvolvimento econômico para o país.

PALAVRAS-CHAVE: RECICLAGEM; AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA; LCA; BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO; AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS; GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS.

ABSTRACT

Forecasts indicate that there will be an exponential increase in waste generation from lithium-ion batteries (LIBs) from 2030 onwards, driven by increased demand for applications in consumer electronics, electric vehicles, and renewable energy storage. Recycling materials from spent LIBs has been pointed out as one of the solutions to reduce the pressure on natural resources from the growing demand for metals, to produce active material from batteries, and disposal in landfills. However, the environmental impacts of recycling processes applicable to LIBs are still poorly known and studied. The available studies on the environmental impacts of recycling LIBs are focused on developed countries and prioritize the recycling of LIBs present in electric vehicles. However, in the waste electronics (WEEE) stream, a significant amount of LIBs can be found, as each portable device has a rechargeable battery attached. Despite the high volume of LIBs in the WEEE flow, there are few studies investigating the impacts and benefits of managing and recycling LIBs present in this flow. The objective of this work was to evaluate the potential environmental impacts of four scenarios for the recycling of LIBs from Smartphones and Notebooks, in the Brazilian context. The assessment considers parameters such as annual waste generation, collection rate and destination of collected waste. The assessment was conducted through the Life Cycle Assessment. The scenario evaluated with the best performance prioritizes recycling in Brazil and reducing the amount of waste from LIBs sent to sanitary landfills. Scenario 4 presents the best performance, with the increase in collection by Reverse Logistics (RL) to 50% of the waste generated and a reduction in the landfill rate by 44.4%, 13 environmental impact categories present net benefits. The results indicate that more significant environmental benefits are achieved when the RL collection rate is increased, and the recovery of materials is carried out by the less impacting technology option. The recycling of LIBs present in WEEE streams has the potential to generate environmental, social and economic benefits for Brazil, as it mitigates pollution from the extraction of non-renewable natural resources and inappropriate disposal, it can generate jobs and income and opportunities for economic development for the country.

Keywords: LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA); SCENARIOS ASSESSMENT; LITHIUM-ION BATTERIES (LIBS); RECYCLING; WASTE MANAGEMENT.

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 Introdução..... | 12 |
| 1.1 Estrutura da dissertação..... | 15 |
| 2 Objetivos..... | 16 |
| 3 Visão geral do método de pesquisa..... | 17 |
| CAPÍTULO I..... | 19 |
| 1 Introdução..... | 20 |
| 2 Revisão teórica..... | 24 |
| 2.1 LCA..... | 24 |
| 2.1.1 Etapas metodológicas da LCA..... | 25 |
| 2.2 Composição das LIBs e potenciais riscos..... | 26 |
| 2.2.1 Potenciais impactos e riscos do gerenciamento inadequado de LIBs no fim de vida..... | 28 |
| 2.2.1.2 Impactos sociais do ciclo de vida das LIBs..... | 29 |
| 2.3 Processos para reciclagem de LIBs..... | 30 |
| 3 Método de Pesquisa..... | 33 |
| 3.1 Identificação e seleção dos estudos..... | 33 |
| 3.2 Análise de conteúdo..... | 35 |
| 4 Resultados e discussão..... | 37 |
| 4.1 Distribuição das publicações por ano e país..... | 38 |
| 4.2 Análise de conteúdo - requisitos metodológicos da LCA..... | 41 |
| 4.2.1 Definição do objetivo e escopo..... | 41 |
| 4.2.2 Função, Unidade Funcional e Fluxo de Referência..... | 42 |
| 4.2.3 Definição dos limites do sistema..... | 44 |
| 4.2.4 Cut-off..... | 46 |
| 4.2.5 Definição do framework de modelagem LCI..... | 47 |
| 4.2.6 Multifuncionalidade..... | 47 |
| 4.2.7 Tipos de produtos e tipos de composição química das LIBs estudadas..... | 48 |
| 4.2.8 Processos de reciclagem..... | 50 |
| 4.2.9 Materiais alvos da reciclagem..... | 54 |
| 4.3 Análise de inventário..... | 54 |
| 4.4 Representatividade dos dados..... | 55 |
| 4.4.1 Avaliação de qualidade dos dados..... | 57 |
| 4.5 Avaliação de Impactos..... | 58 |
| 4.5.1 Método de avaliação de impactos..... | 60 |
| 4.6 Interpretação..... | 60 |
| 4.6.1 Hotspots..... | 61 |
| 4.6.2 Análise de incerteza e sensibilidade..... | 61 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 5 | Recomendações para futuros estudos de LCA em sistemas de reciclagem de LIBs..... | 62 |
| 6 | Conclusão | 64 |
| | CAPÍTULO II..... | 66 |
| 1 | Introdução..... | 67 |
| 2 | Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) | 69 |
| 2.1 | Fases da LCA | 70 |
| 2.2 | LCA de reciclagem de LIBs | 71 |
| 3 | Método..... | 72 |
| 3.1 | Modelagem de cenários para a reciclagem de LIBs no Brasil | 73 |
| 3.2 | Modelagem dos fluxos de resíduos de Smartphones, Notebooks e LIBs..... | 76 |
| 3.2.1 | Estimativa da geração de resíduos de Notebooks e Smartphones | 76 |
| 3.2.2 | Estimativa da geração de resíduos de células LIBs | 78 |
| 3.3 | Etapas da LCA..... | 78 |
| 3.3.1 | Definição do Objetivo e Escopo..... | 78 |
| 3.3.1.1 | Definição do contexto de decisão | 79 |
| 3.3.2 | Definição do escopo | 79 |
| 3.3.3 | Definição do Sistema de Produto e Fronteira do Sistema | 81 |
| 3.3.4 | Análise de Inventário..... | 89 |
| 3.3.5 | Avaliação de impactos..... | 98 |
| 3.3.6 | Interpretação | 99 |
| 3.3.7 | Premissas e limitações | 99 |
| 4 | Resultados e discussão | 100 |
| 4.1 | Análise de contribuição das tecnologias de reciclagem | 101 |
| 4.2 | Avaliação dos cenários com base em 1t de fluxo de referência | 109 |
| 4.3 | Avaliação com base no fluxo de referência de geração total em cada ano | 111 |
| 4.4 | Análise de sensibilidade | 112 |
| 4.5 | Análise de incerteza..... | 114 |
| 4.6 | Implicações da reciclagem de LIBs em um contexto de Economia Circular e geração de valor..... | 115 |
| 5 | Conclusões..... | 117 |
| | CONCLUSÃO..... | 120 |
| | REFERÊNCIAS | 122 |
| | APÊNDICES..... | 136 |
| | APÊNDICE A - Estimativa de geração de resíduos de Smartphones e Notebooks..... | 137 |
| | APÊNDICE B - Resultados da avaliação - processos unitários..... | 141 |
| | APÊNDICE C – Impactos da reciclagem no exterior e comparação com o processo brasileiro | 146 |

| | |
|---|-----|
| APÊNDICE D – Balanço de massa e avaliação de impactos dos cenários modelados com fluxo de referência de 1t..... | 150 |
| APÊNDICE E – Balanço de massa e avaliação de impactos dos cenários modelados com fluxo de referência de geração anual de resíduos. | 159 |
| APÊNDICE F – Resultados análise de sensibilidade e incerteza..... | 168 |
| APÊNDICE G – Estequiometria..... | 171 |

1 Introdução

A gestão inadequada de resíduos impõe uma carga significativa ao meio ambiente e à saúde humana (Wolf et al., 2022). A geração e o gerenciamento de resíduos sólidos urbanos contribuí para as mudanças climáticas e compromete a qualidade ambiental (Gomez-Sanabria et al., 2022). Uma das classes de resíduos sólidos que têm causado grandes preocupações globais são os Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) e seus componentes (Rene et al., 2021; Souza et al., 2016; Beula & Sureshkumar, 2021). O aumento da demanda por Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (EEE) aliado a ciclos de vida mais curtos dos produtos, tem acarretado altas taxas de geração de REEE (Chen et al., 2021; Rautela et al., 2021). Somente em 2019, gerou-se 53,6 milhões de toneladas (Mt) de REEE globalmente (Forti et al., 2020). As previsões apontam que a geração deve continuar em expansão, aumentando em média 3% a 4% ao ano (Shittu et al., 2021; Cucchiella et al., 2015).

O gerenciamento inadequado dos REEE causa sérios danos ao meio ambiente e à saúde humana (Chen et al., 2021; Rautela et al., 2021). Os perigos são derivados da presença de substâncias perigosas na composição dos materiais, como metais pesados, cromo hexavalente, retardadores de chama bromados, poluentes orgânicos persistentes e baterias (Huang et al., 2015; Rene et al., 2021). O descarte em aterro ou a incineração não são considerados opções de tratamento adequados para os REEE e seus componentes, pois apresentam riscos potenciais de contaminação do ar e da água; os lixiviados do aterro podem transportar substâncias tóxicas para as águas subterrâneas; a incineração pode emitir gases tóxicos para a atmosfera (Kiddee, Naidu & Wong, 2013)

Em contrapartida, os REEE podem ser considerados fontes promissoras de matéria-prima secundária (Otoni et al., 2020; Xavier et al., 2021). Alguns componentes, como as Placas de Circuito Impresso (PCI) e as Baterias de íons de lítio (LIBs), fornecem a recuperação de altos conteúdos de metais preciosos e críticos¹ (Bookhagen et al., 2020; Sethurajan et al., 2019; Kumar et al., 2017). Muitos esforços têm sido direcionados para a recuperação de metais das PCI, pois um alto conteúdo de metais valiosos, como Ouro (Au), Prata (Ag), Paládio (Pd) e Cobre (Cu) podem ser recuperadas de PCI descartadas (Petter et al., 2014; Kaya, 2019).

A reciclagem de LIBs têm recebido cada vez mais atenção, pois possuem em sua composição metais críticos como Cobalto (Co) e Lítio (Li), e metais básicos como Cobre (Cu),

¹Matérias-primas críticas: qualquer substância que esteja sujeita a riscos de fornecimento e para a qual não haja substitutos fáceis; a criticidade é conceituada como uma função da probabilidade e gravidade das interrupções no fornecimento de determinada matéria-prima (Santillán-Saldivar et al., 2021).

Alumínio (Al), Ferro (Fe) e Níquel (Ni) (Zheng et al., 2013; Buchert et al., 2012). As LIBs presentes em *Smartphones* e *Notebooks* são uma fonte promissora para a recuperação de Cobalto (Cucchiella et al., 2015). Somente em uma única bateria de *Notebook*, podem ser encontrados até 65g de Cobalto (Hagelüken & Corti, 2010). E, em baterias de *Smartphones*, até 6,3g de Cobalto (Buchert et al., 2012; He et al., 2020).

Entretanto, se as LIBs em fim de vida forem mal gerenciadas, sendo descartadas ou recicladas de forma inadequada, podem provocar graves efeitos adversos à saúde humana e ao meio ambiente (Winslow et al., 2018; Mrozik et al., 2021; Wang et al., 2021). Os resíduos de LIBs são considerados perigosos, pois constituem-se de materiais potencialmente tóxicos, como os metais pesados e os polímeros e materiais orgânicos perigosos e inflamáveis do eletrólito (Kang et al., 2013; Zheng et al., 2018). Os eletrólitos contêm solventes orgânicos, sais de lítio e aditivos que, em contato com o meio ambiente, podem se decompor em substâncias perigosas, como arsênico e fósforo (Jin et al., 2022). Se as LIBs forem descartadas junto ao lixo comum, incêndios podem ocorrer nos veículos de coleta e nos aterros sanitários (Winslow et al., 2018). Se uma LIB for incinerada com resíduos sólidos gerais, produzirá gases tóxicos, como o fluoreto de hidrogênio, resultando em poluição atmosférica (Zhang et al., 2018). O descarte de LIBs em aterros podem contaminar o solo e águas subterrâneas, pois os metais pesados podem lixiviar (Raj et al., 2022). As reações químicas dos solventes orgânicos liberam formaldeídos e metanol, ambos com potencial para poluir as águas (Jin et al., 2022).

Portanto, o descarte ou tratamento inadequado das LIBs resulta em poluição do meio ambiente e na perda de recursos materiais valiosos (Meshram et al, 2020). A recuperação de matérias-primas das LIBs, através da reciclagem, é apontada como uma solução adequada para limitar a necessidade de extração de recursos naturais e mitigar a poluição do descarte inadequado (Ducoli et al., 2022). A prevenção de impactos no setor de mineração pode ser reduzida por abordagens de ciclo fechado e sustentável de Economia Circular, como a mineração urbana de REEE (XAVIER et al., 2021).

Além disso, a disponibilidade futura de metais é um tópico complexo que têm suscitado preocupações (Harper et al., 2019). A transição energética para fontes de baixo carbono depende fortemente de matérias-primas, como cobalto e lítio, que atualmente são obtidos principalmente da extração primária (Herrington, 2021). O aumento estimado na demanda por matérias-primas relacionadas a LIBs, para uso em veículos elétricos e armazenamento de energia renovável, terá um impacto significativo nas rotas de produção de matérias-primas primárias globais (European Union, 2020a). Estima-se que até 2050, a demanda por matérias-

primas como o Grafite, Cobalto e Lítio tenham um aumento de mais de 450% cada (Herrington, 2021). Nesse contexto, os estoques antropogênicos de materiais secundários são considerados meios-chave para garantir o fornecimento de recursos (Matos et al., 2022). A reciclagem de metais de fluxos de resíduos será cada vez mais importante para o atendimento da demanda futura e para o alcance das metas de desenvolvimento sustentável (UNEP, 2011; Graedel et al., 2011)

As LIBs presentes em REEE, como *Smartphones* e *Notebooks*, são uma fonte em potencial para a recuperação desses materiais secundários importantes. As baterias recarregáveis LIBs são a fonte de energia portátil mais utilizada em produtos eletrônicos de consumo (Buchert et al., 2012; Chang et al., 2009). Estima-se que 75% das LIBs fabricadas são usadas em eletrônicos de consumo (Sun et al., 2017). A grande penetração no mercado de *Notebooks* e *Smartphones*, com as vendas de dispositivos novos crescendo a taxas rápidas, revela a importância do gerenciamento adequado e recuperação de recursos destes dispositivos (He et al., 2020). Em 2021, aproximadamente 261 milhões de *Notebooks* foram vendidos em todo o mundo; espera-se que mais 259 milhões sejam vendidos em 2022 (STATISTA, 2022a). Em relação às vendas globais de *Smartphones*, em 2021, 1,38 bilhões de dispositivos foram vendidos globalmente, e, em 2022, espera-se um crescimento de 4%, chegando-se a 1,43 bilhões de novos dispositivos vendidos (STATISTA, 2022b). No cenário brasileiro, as vendas de *Notebooks* e *Smartphones* também representam um alto volume. Segundo a Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE), em 2021 foram vendidos, aproximadamente 40 milhões de Smartphones e 5,0 milhões de Notebooks no mercado nacional (ABINEE, 2022).

Existe grande potencial de geração de resíduos LIBs nos fluxos de REEE e, consequentemente, a recuperação de metais pela reciclagem (Buchert et al., 2012; Chang et al., 2009). Contudo, para que a reciclagem das LIBs seja realmente benéfica torna-se essencial o desenvolvimento, implementação e avaliação de processos adequados (Nature Energy, 2019; Meshram et al., 2020). No entanto, para o contexto das LIBs ainda não está claro qual ou quais métodos de reciclagem são ambientalmente preferidos (Rey et al., 2021). As tecnologias para a reciclagem de LIBs em fim de vida ainda se encontram em estágios iniciais de implantação em escalas industriais (Rhee, Jang, Kim, 2021). E, embora a reciclagem possa levar a benefícios ambientais, o benefício real depende do impacto da produção da matéria-prima e do consumo direto de recursos para o processo de reciclagem (Stucki et al., 2021). Portanto, para desenvolver sistemas de reciclagem mais sustentáveis é obrigatória a aplicação de abordagem

de avaliações sistêmicas, que considerem todos os processos, etapas e recursos envolvidos nos processos (Agusdinata et al., 2018; Rocha & Penteado, 2021).

A técnica de Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) tem sido apontada como uma técnica de avaliação adequada para quantificar as implicações ambientais de sistemas de gerenciamento de resíduos, pois permite capturar os potenciais impactos ambientais associados ao sistema de gerenciamento em uma abordagem sistêmica, para evitar a transferência de cargas para outros compartimentos ambientais (Laurent et al., 2013a). A LCA é uma abordagem científica holística, amplamente utilizada para avaliar os impactos ambientais do ciclo de vida de produtos, processos e serviços (Santillán-Saldivar et al., 2021). No apoio às políticas de gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU), a LCA pode servir para comparar os impactos ambientais de duas ou mais opções de processamento de resíduos (Laurent et al., 2013; Meylan et al., 2014). É considerada uma técnica ideal para investigar os impactos ambientais dos processos de reciclagem, pois fornece uma estrutura padronizada e sistemática para trazer à tona questões sobre os fluxos principais de poluição direta e indireta (Chordia et al., 2021).

1.1 Estrutura da dissertação

Além desta seção introdutória, que contempla a contextualização sobre o tema e os objetivos da pesquisa, este trabalho é constituído por dois capítulos organizados como artigos científicos independentes, mas conectados por um tema central: avaliação de impactos ambientais em processos de reciclagem de resíduos de Baterias de íons de lítio (LIBs) utilizando a técnica de avaliação LCA.

O Capítulo I, intitulado “Revisão da Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) na reciclagem de Baterias de íons de lítio”, teve como objetivo revisar e analisar criticamente os estudos existentes sobre LCA aplicada à reciclagem de LIBs, buscando sumarizar o estado-da-arte para fornecer orientações para a melhoria desses sistemas de reciclagem e uma agenda de pesquisa para futuros estudos de LCA. Para tanto, utilizou-se do método de Revisão Sistemática da Literatura conjuntamente a análise de conteúdo para mapear a evolução das publicações, representatividade geográfica, características e origem dos resíduos LIBs, processos de reciclagem aplicáveis e as escolhas metodológicas na aplicação da técnica de LCA. Os principais resultados apontaram lacunas importantes de conhecimento, destacando-se a falta de estudos sobre o impacto ambiental da reciclagem de LIBs presentes em fluxos de REEE, a escassez de estudos em países em desenvolvimento, a ausência de dados completos sobre o

consumo de recursos e emissões dos processos de reciclagem e a cobertura limitada de categorias de avaliação de impactos ambientais.

O Capítulo II, intitulado “Avaliação do Ciclo de Vida de cenários para reciclagem de baterias de íons de lítio no Brasil”, teve como objetivo avaliar os potenciais impactos e benefícios ambientais de diferentes cenários para a reciclagem de LIBs no Brasil, aplicando a técnica de LCA, visando contribuir com o desenvolvimento de sistemas de reciclagem sustentáveis para a recuperação de materiais dos resíduos LIBs nos fluxos de resíduos REEE. O estudo fornece a estimativa de geração de resíduos LIBs no Brasil, oriundos de *Smartphones* e *Notebooks* descartados, para os próximos quatro anos e a avaliação dos potenciais impactos ambientais de quatro cenários para gerenciamento desses resíduos. Além disso, um processo de referência para a reciclagem de LIBs no Brasil foi mapeado e avaliado quanto aos potenciais impactos ambientais, o que permitiu a elaboração de um inventário do ciclo de vida para o processo, a identificação dos principais *hotspots* ambientais da reciclagem de LIBs no Brasil e a quantificação dos potenciais benefícios da recuperação dos materiais pela reciclagem.

Por fim, uma seção de conclusão geral sumariza as principais conclusões deste trabalho, limitações e oportunidades de pesquisas futuras.

2 Objetivos

O objetivo geral do presente trabalho é avaliar os potenciais impactos e benefícios ambientais de diferentes cenários de reciclagem para LIBs no Brasil, utilizando a técnica de LCA, visando contribuir com o desenvolvimento de padrões mais sustentáveis para a recuperação de materiais dos fluxos de resíduos para a destinação ambientalmente correta² destes resíduos perigosos.

² Adota-se a definição de Destinação e Disposição final Ambientalmente Correta de acordo com a Lei 12.305/2010 (BRASIL, 2010):

“VII - **destinação final ambientalmente adequada**: destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos.”

“VIII - **disposição final ambientalmente adequada**: distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos.”

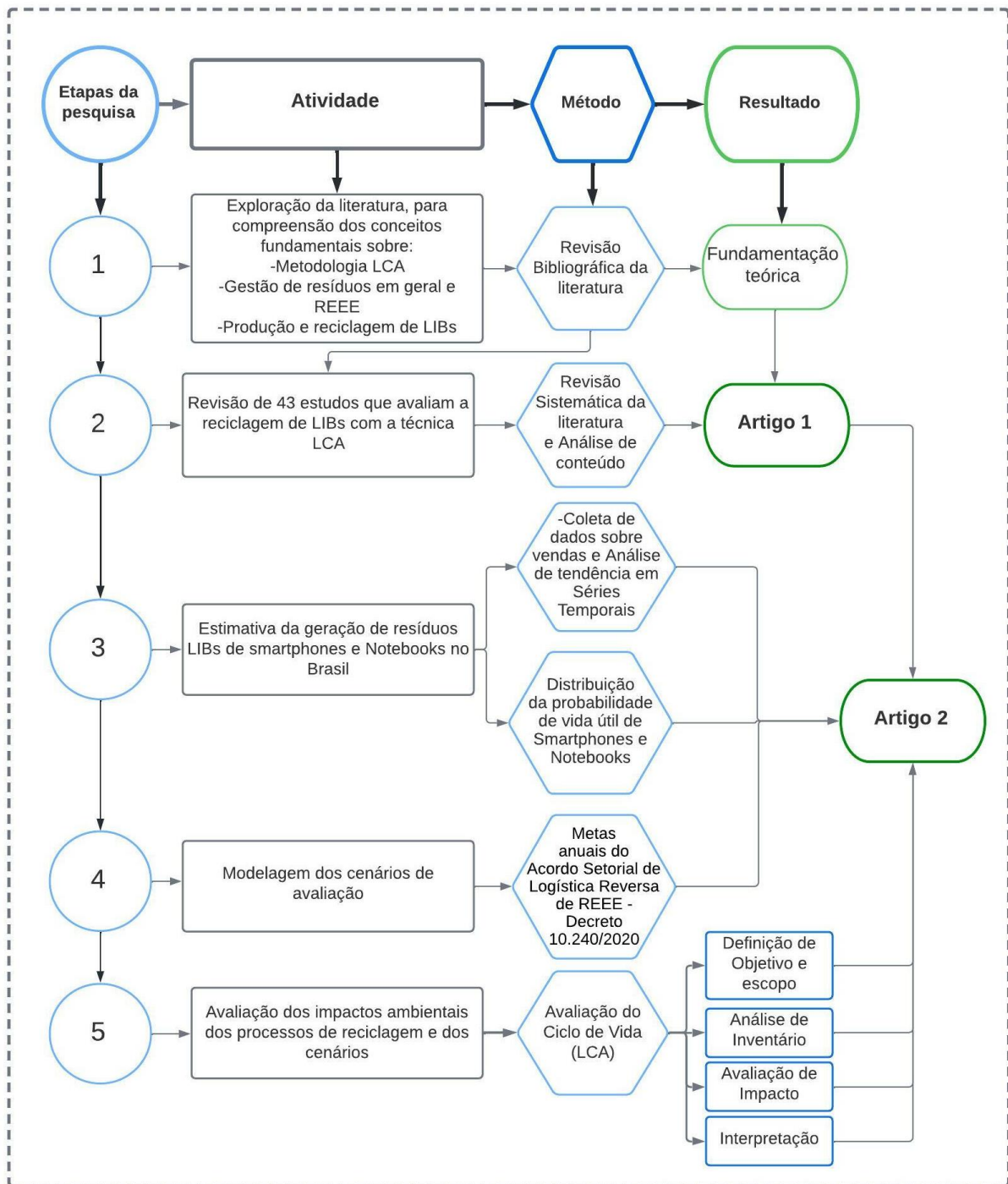
2.1 Objetivos específicos

- Mapear e revisar sistematicamente os estudos de LCA que avaliam a reciclagem de LIBs (Artigo 1).
- Identificar questões críticas de lacunas de dados e aplicação da metodologia LCA nos estudos revisados (Artigo 1);
- Mapear e analisar os processos de reciclagem de LIBs no Brasil e no mundo (Artigo 1);
- Elaborar um inventário de ciclo de vida para o processo de reciclagem investigado como referência para implementação no Brasil (Artigo 2);
- Avaliar os potenciais impactos ambientais da reciclagem de LIBs, considerando diferentes cenários alternativos, em que a logística reversa seja promovida e adotada progressivamente (Artigo 2);
- Identificar os principais *hotspots* da reciclagem de LIBs no Brasil (Artigo 2);
- Propor melhorias para a mitigação de impactos ambientais negativos (Artigo 2).

3 Visão geral do método de pesquisa

A condução do trabalho exigiu a aplicação de diferentes métodos, de acordo com as atividades propostas para cada etapa de desenvolvimento, coleta e análise de dados. A Figura 1 (Introdução) apresenta uma síntese do fluxo de trabalho da pesquisa, resumindo as etapas, atividades e procedimento metodológicos desenvolvidos. A pesquisa seguiu cinco etapas sequenciais e complementares. Os resultados principais da dissertação são os dois artigos (Capítulo I e Capítulo II). Os detalhes dos procedimentos metodológicos são encontrados na seção correspondente de cada um dos artigos desenvolvidos.

Figura 1. (Introdução) - Resumo gráfico das etapas e métodos aplicados na pesquisa.



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

CONCLUSÃO

A reciclagem das LIBs é um tema emergente, devido a sua relevância nas políticas de armazenamento de energias renováveis e descarbonização dos sistemas antrópicos. Além disso são componentes essenciais para os dispositivos móveis amplamente utilizados nas sociedades modernas. Por esses motivos, a demanda por LIBs deve aumentar significativamente nas próximas décadas, o que implica em desafios adicionais no fornecimento de recursos para a sua produção e gestão de resíduos. A reciclagem em circuito fechado deve fornecer grande parte dos materiais metálicos necessários para a fabricação futura das LIBs. No entanto, as implicações ambientais dos processos de reciclagem ainda são pouco conhecidas, o que gera incertezas em relação à escolha da tecnologia de reciclagem ambientalmente mais benigna.

O fluxo de LIBs presentes nos REEE apresentam um alto volume de recursos valiosos que, se corretamente reciclados, podem ser reintroduzidos nas cadeias produtivas e gerar benefícios ambientais, sociais e econômicos. Os principais benefícios ambientais são derivados da redução do consumo e extração de minerais metálicos primários e da redução da poluição pelo descarte inadequado. Os benefícios sociais podem ser traduzidos, mas não se limitando, em geração de emprego e renda, ao longo de toda a cadeia de valor gerada pela implantação de plantas industriais de reciclagem no país. A reciclagem de LIBs tem potencial para recuperar metais valiosos, que possuem preços atrativos nos mercados de commodities internacional, podendo gerar novas fontes para o comércio, bem como fomentar o desenvolvimento industrial do país, atraindo investimentos e instalações de indústrias de produção de LIBs no país.

Primeiramente, este trabalho contribui com a literatura com uma revisão abrangente e sistemática, executada nos estudos de LCA em processos de reciclagem de LIBs, para o aumento do conhecimento sobre os impactos ambientais da reciclagem das LIBs, fornecendo uma síntese dos estudos disponíveis e das lacunas de pesquisa. Por meio da análise aprofundada das características metodológicas dos estudos e identificação de lacunas de pesquisa, este estudo fornece uma agenda para o desenvolvimento de pesquisas futuras. Para os tomadores de decisão, a LCA fornece dados quantitativos e científicos para a escolha entre diferentes alternativas. Este estudo fornece uma visão geral das implicações ambientais até agora avaliadas por estudos de LCA, esclarecendo as vantagens e desvantagens de diferentes métodos de reciclagem, o que pode orientar o desenvolvimento e implementação de tecnologias sustentáveis para o gerenciamento e recuperação de materiais valiosos desse fluxo de resíduos.

Em segundo lugar, com os resultados de avaliação de impactos ambientais para cenários prospectivos de reciclagem de resíduos de LIBs em fluxos de REEE no Brasil, este trabalho

contribui para algumas das lacunas identificadas na revisão da literatura, como a avaliação dos impactos e benefícios ambientais da reciclagem de LIBs oriundas de REEE e gerenciadas em um contexto de país em desenvolvimento. Além disso, a quantificação e análise dos benefícios da progressão para um sistema formal de coleta e reciclagem e redução da taxa de aterro são fornecidos. Os resultados da LCA mostram que benefícios ambientais mais significativos são alcançados quando a taxa de coleta pela LR é aumentada e a recuperação de materiais é feita pela opção de tecnologia menos impactante.

Os resultados da avaliação incorporam parâmetros relacionados ao tipo de coleta e proporção dos resíduos de LIBs gerados no Brasil, fornecendo informações para os tomadores de decisão para responder a questões sobre qual a melhor estratégia para o gerenciamento desse tipo de resíduo no Brasil. Os impactos e benefícios líquidos da reciclagem de LIBs no Brasil também foram quantificados, e os resultados podem auxiliar os tomadores de decisão a promover a reciclagem de LIBs no Brasil, esclarecer sobre os pontos críticos ambientais da rota hidrometalúrgica e os benefícios da recuperação de materiais.

Entretanto, algumas limitações são encontradas, derivadas de premissas e suposições assumidas, uso de dados secundários para os processos de reciclagem no exterior e produção de produtos químicos. Portanto, desenvolvimentos adicionais podem melhorar a avaliação da gestão de resíduos de LIB no Brasil, dimensionando e incluindo na avaliação os impactos referentes as etapas de coleta, transporte e triagem dos produtos *Smartphones* e *Notebooks*, bem como a inclusão de outros produtos como LIBs de veículos elétricos. Outra oportunidade de pesquisa refere-se à contabilização dos impactos evitados em ciclo fechado. Neste estudo, os impactos evitados foram avaliados com base em um ciclo aberto de reciclagem, onde os materiais recuperados deslocam a extração, beneficiamento e refino de metais brutos, estudos futuros podem avaliar a mudança no perfil ambiental se a reciclagem for avaliada em um ciclo fechado, onde os materiais recuperados retornam na cadeia upstream para produzir materiais precursores na própria produção de LIBs. As implicações da recuperação de outros tipos de materiais, como plásticos, cobre, aço e alumínio dos invólucros e coletores de corrente podem melhorar o desempenho do processo atual e devem ser objeto de estudos. Por fim, uma contribuição importante para a literatura será a avaliação da sustentabilidade do ciclo de vida das LIBs, incluindo no escopo todas as etapas do ciclo de vida, desde a extração de matéria-prima até as opções de disposição final, considerando impactos ambientais, sociais e econômicos.

REFERÊNCIAS

- AALTONEN, M. et al. Leaching of Metals from Spent Lithium-Ion Batteries. **Recycling** **2017**, Vol. 2, Page 20, v. 2, n. 4, p. 20, 2017.
- ABBONDANZA, M. N. M.; SOUZA, R. G. Estimating the generation of household e-waste in municipalities using primary data from surveys: A case study of Sao Jose dos Campos, Brazil. **Waste Management**, v. 85, p. 374–384, 2019.
- ABNT(a). **14040. Gestão ambiental–Avaliação do ciclo de vida–Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT**, 2009. Disponível em: <www.abnt.org.br>
- ABNT(b). **14044. Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT**, 2009. Disponível em: <www.abnt.org.br>
- ALLACKER, K. et al. Allocation solutions for secondary material production and end of life recovery: Proposals for product policy initiatives. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 88, p. 1–12, 2014.
- AMNESTY INTERNATIONAL. Democratic Republic of the Congo: Time to recharge: Corporate action and inaction to tackle abuses in the cobalt supply chain . Amnesty International, 2017. Disponível em: <https://www.amnesty.org/en/documents/afr62/7395/2017/en/>
- ANWANI, S.; METHEKAR, R.; RAMADESIGAN, V. Life cycle assessment and economic analysis of acidic leaching and baking routes for the production of cobalt oxalate from spent lithium-ion batteries. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 22, n. 6, p. 2092–2106, 2020a.
- ANWANI, S.; METHEKAR, R.; RAMADESIGAN, V. Resynthesizing of lithium cobalt oxide from spent lithium-ion batteries using an environmentally benign and economically viable recycling process. **Hydrometallurgy**, v. 197, 2020b.
- ARSHAD, F. et al. Life Cycle Assessment of Lithium-ion Batteries: A Critical Review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 180, p. 106164, 2022.
- ARUSHANYAN, Y. et al. Environmental Assessment of Possible Future Waste Management Scenarios. **Energies** **2017**, Vol. 10, Page 247, v. 10, n. 2, p. 247, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA (ABINNE). (2022). Desempenho do Setor: Atividade dos setor: Dados atualizados em março de 2022. Disponível em: <http://www.abinee.org.br/abinee/decon/decon15.htm>. Acesso em 10 abr 2022.
- AWASTHI, A. K. et al. Evaluating waste printed circuit boards recycling: Opportunities and challenges, a mini review: <https://doi.org/10.1177/0734242X16682607>, v. 35, n. 4, p. 346–356, 2017.
- BAARS, J. et al. Circular economy strategies for electric vehicle batteries reduce reliance on raw materials. **Nature Sustainability** **2020 4:1**, v. 4, n. 1, p. 71–79, 2020.

BABBITT, C. W. et al. Disassembly-based bill of materials data for consumer electronic products. **Scientific Data**, v. 7, n. 1, 2020.

BBC. Top tech firms sued over DR Congo cobalt mining deaths, BBC Africa, 2019. Disponível em: <https://www.bbc.com/news/world-africa-50812616>

BRASIL. Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Lei nº 12.305/10 de 02 de agosto de 2010.

BRASIL. Logística Reversa de Produtos Eletroeletrônicos. Decreto Nº 10.240 DE 12/02/2020.

BAUER, C. et al. Charging sustainable batteries. **Nature Sustainability** 2022 5:3, v. 5, n. 3, p. 176–178, 2022.

BELOIN-SAINT-PIERRE, D. et al. Addressing temporal considerations in life cycle assessment. **Science of The Total Environment**, v. 743, p. 140700, 2020.

BERGERSON, J.; CUCURACHI, S.; SEAGER, T. P. Bringing a life cycle perspective to emerging technology development. **Journal of Industrial Ecology**, v. 24, n. 1, p. 6–10, 2020.

BEULA, D.; SURESHKUMAR, M. A review on the toxic E-waste killing health and environment – Today's global scenario. **Materials Today: Proceedings**, 2021.

BIAN, J. et al. Comparative environmental life cycle assessment of waste mobile phone recycling in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 131, p. 209–218, 2016.

BISINELLA, V.; CHRISTENSEN, T. H.; ASTRUP, T. F. Future scenarios and life cycle assessment: systematic review and recommendations. **The International Journal of Life Cycle Assessment** 2021, v. 1, p. 1–28, 2021.

BOBBA, S. et al. 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, 2018.

BOOKHAGEN, B. et al. Metallic resources in smartphones. **Resources Policy**, v. 68, p. 101750, 2020.

BOYDEN, A.; SOO, V. K.; DOOLAN, M. The Environmental Impacts of Recycling Portable Lithium-Ion Batteries. **Procedia CIRP**, v. 48, p. 188–193, 2016.

CELLURA, M.; LONGO, S.; MISTRETTA, M. Sensitivity analysis to quantify uncertainty in Life Cycle Assessment: The case study of an Italian tile. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 4697–4705, 2011.

CHANG, T. C. et al. A material flow of lithium batteries in Taiwan. **Journal of Hazardous Materials**, v. 163, n. 2–3, p. 910–915, 2009.

CHEN, X.; MATTHEWS, H. S.; GRIFFIN, W. M. Uncertainty caused by life cycle impact assessment methods: Case studies in process-based LCI databases. **Resources, Conservation**

and Recycling, v. 172, p. 105678, 2021.

CHERUBINI, F.; BARGIGLI, S.; ULGIATI, S. Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration. **Energy**, v. 34, n. 12, p. 2116–2123, 2009.

CHORDIA, M.; NORDELÖF, A.; ELLINGSEN, L. A. W. Environmental life cycle implications of upscaling lithium-ion battery production. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 26, n. 10, p. 2024–2039, 2021.

CIEZ, R. E.; WHITACRE, J. F. Examining different recycling processes for lithium-ion batteries. **Nature Sustainability** 2019 2:2, v. 2, n. 2, p. 148–156, 2019.

CORDELLA, M. et al. Improving material efficiency in the life cycle of products: a review of EU Ecolabel criteria. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, n. 5, p. 921–935, 2020.

CORDELLA, M.; ALFIERI, F.; SANFELIX, J. Reducing the carbon footprint of ICT products through material efficiency strategies: A life cycle analysis of smartphones. **Journal of Industrial Ecology**, v. 25, n. 2, p. 448–464, 2021.

COROMINAS, L. et al. The application of life cycle assessment (LCA) to wastewater treatment: A best practice guide and critical review. **Water Research**, v. 184, p. 116058, 2020.

CRENNA, E. et al. Towards more flexibility and transparency in life cycle inventories for Lithium-ion batteries. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 170, p. 105619, 2021.

CUCCHIELLA, F. et al. Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, p. 263–272, 2015.

CURRAN, M. A. Life Cycle Assessment: a review of the methodology and its application to sustainability. **Current Opinion in Chemical Engineering**, v. 2, n. 3, p. 273–277, 2013.

CUSENZA, M. A. et al. Energy and environmental assessment of a traction lithium-ion battery pack for plug-in hybrid electric vehicles. **Journal of Cleaner Production**, v. 215, p. 634–649, 2019.

COSTA, Rodrigo Calçada da. Reciclagem de baterias de íons de lítio por processamento mecânico. 2010. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia UFRGS, 2010.

DAS, S. et al. Solid waste management: Scope and the challenge of sustainability. **Journal of Cleaner Production**, v. 228, p. 658–678, 2019.

DE MORAIS LIMA, P. et al. Life Cycle Assessment of prospective MSW management based on integrated management planning in Campo Grande, Brazil. **Waste Management**, v. 90, p. 59–71, 2019.

DELGADO, M. A. S. et al. Comparative life cycle assessment of a novel Al-ion and a Li-ion battery for stationary applications. **Materials**, v. 12, n. 19, 2019.

DIAS, P. et al. Waste electric and electronic equipment (WEEE) management: A study on the Brazilian recycling routes. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 7–16, 2018.

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

DUCOLI, S. et al. ESCAPE approach for the sustainability evaluation of spent lithium-ion batteries recovery: Dataset of 33 available technologies. **Data in Brief**, v. 42, p. 108018, 2022.

DUNN, J. et al. The significance of Li-ion batteries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling's role in its reduction. **Energy & Environmental Science**, v. 8, n. 1, p. 158–168, 2014.

EDELEN, A.; INGWERSEN, W. W. The creation, management, and use of data quality information for life cycle assessment. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, n. 4, p. 759–772, 2018.

EKVALL, T. et al. Modelling incineration for more accurate comparisons to recycling in PEF and LCA. **Waste Management**, v. 136, p. 153–161, 2021.

ELLINGSEN, L. A. W.; HUNG, C. R.; STRØMMAN, A. H. Identifying key assumptions and differences in life cycle assessment studies of lithium-ion traction batteries with focus on greenhouse gas emissions. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 55, p. 82–90, 2017.

EUROPEAN COMMISSION - JOINT RESEARCH CENTRE - INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook : Analysing of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment. **European Commission**, 2010.

FAHIMI, A. et al. Evaluation of the sustainability of technologies to recycle spent lithium-ion batteries, based on embodied energy and carbon footprint. **Journal of Cleaner Production**, v. 338, p. 130493, 2022.

FAN, E. et al. Sustainable Recycling Technology for Li-Ion Batteries and Beyond: Challenges and Future Prospects. **Chemical Reviews**, v. 120, n. 14, p. 7020–7063, 2020.

FENG, D.; SONG, C.; MO, W. Environmental, human health, and economic implications of landfill leachate treatment for per- and polyfluoroalkyl substance removal. **Journal of Environmental Management**, v. 289, p. 112558, 2021.

FERRARA, C. et al. Circular Economy and the Fate of Lithium Batteries: Second Life and Recycling. **Advanced Energy and Sustainability Research**, v. 2, n. 10, p. 2100047, 2021.

FINKBEINER, M. et al. Towards life cycle sustainability assessment. **Sustainability**, 2010.

FINNVEDEN, G. et al. Recent developments in Life Cycle Assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 1, p. 1–21, 2009.

FISCHER, K. et al. Battery Waste Management Life Cycle Assessment, 2006. Final Report for Publication, Environmental Resources Management, 2006.

- GAINES, L. et al. Life-cycle analysis of production and recycling of lithium ion batteries. **Transportation Research Record**, n. 2252, p. 57–65, 2011.
- GAINES, L.; RICHA, K.; SPANGENBERGER, J. Key issues for Li-ion battery recycling. **MRS Energy & Sustainability**, v. 5, n. 1, 2018.
- GAO, H. et al. Efficient Direct Recycling of Degraded LiMn₂O₄ Cathodes by One-Step Hydrothermal Relithiation. **ACS Applied Materials and Interfaces**, v. 12, n. 46, p. 51546–51554, 2020.
- GAVANKAR, S.; SUH, S. Fusion of conflicting information for improving representativeness of data used in LCAs. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, n. 3, p. 480–490, 2014.
- GÓMEZ-SANABRIA, A. et al. Potential for future reductions of global GHG and air pollutants from circular waste management systems. **Nature Communications** 2022 **13:1**, v. 13, n. 1, p. 1–12, 2022.
- GOULART COELHO, L. M.; LANGE, L. C. Applying life cycle assessment to support environmentally sustainable waste management strategies in Brazil. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 128, p. 438–450, 2018.
- GRANATA, G. et al. Product recovery from Li-ion battery wastes coming from an industrial pre-treatment plant: Lab scale tests and process simulations. **Journal of Power Sources**, v. 206, p. 393–401, 2012.
- GU, F. et al. An investigation of the current status of recycling spent lithium-ion batteries from consumer electronics in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 161, p. 765–780, 2017.
- HAGELÜKEN, C.; CORTI, C. W. Recycling of gold from electronics: Cost-effective use through “Design for Recycling”. **Gold Bulletin**, v. 43, 2010.
- HANSEN, S. V.; HUIJBREGTS, M. A. J. Assessing the environmental benefits of utilising residual flows. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 150, p. 104433, 2019.
- HARPER, G. et al. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. **Nature** 2019 **575:7781**, v. 575, n. 7781, p. 75–86, 2019.
- HE, X.; YU, D. Research trends in life cycle assessment research: A 20-year bibliometric analysis (1999–2018). **Environmental Impact Assessment Review**, v. 85, p. 106461, 2020.
- HEIJUNGS, R.; GUINÉE, J. B. Allocation and ‘what-if’ scenarios in life cycle assessment of waste management systems. **Waste Management**, v. 27, n. 8, p. 997–1005, 2007.
- HEIJUNGS, R.; HUPPES, G.; GUINÉE, J. B. Life cycle assessment and sustainability analysis of products, materials and technologies. Toward a scientific framework for sustainability life cycle analysis. **Polymer Degradation and Stability**, v. 95, n. 3, p. 422–428, 2010.
- HENRIKSEN, T.; ASTRUP, T. F.; DAMGAARD, A. Linking Data Choices and Context Specificity in Life Cycle Assessment of Waste Treatment Technologies: A Landfill Case Study. **Journal of Industrial Ecology**, v. 22, n. 5, p. 1039–1049, 2018.
- HENRIKSEN, T.; ASTRUP, T. F.; DAMGAARD, A. Data representativeness in LCA: A framework for the systematic assessment of data quality relative to technology characteristics. **Journal of Industrial Ecology**, v. 25, n. 1, p. 51–66, 2021.

HERRINGTON, R. Mining our green future. *Nature Reviews Materials*, v. 6, n. 6, p. 456-458, 2021.

HOBSON, K.; LYNCH, N.. Diversifying and de-growing the circular economy: Radical social transformation in a resource-scarce world. *Futures*, v. 82, p. 15-25, 2016.

HÖJER, M. et al. Scenarios in selected tools for environmental systems analysis. *Journal of Cleaner Production*, v. 16, n. 18, p. 1958–1970, 2008.

HUA, Y. et al. Sustainable value chain of retired lithium-ion batteries for electric vehicles. *Journal of Power Sources*, v. 478, p. 228753, 2020.

HUANG, B. et al. Recycling of lithium-ion batteries: Recent advances and perspectives. *Journal of Power Sources*, v. 399, p. 274–286, 2018.

HUIJBREGTS, M. A. J. et al. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 2016 **22:2**, v. 22, n. 2, p. 138–147, 2016.

HUMMEN, T.; DESING, H. When to replace products with which (circular) strategy? An optimization approach and lifespan indicator. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 174, p. 105704, 2021.

MONTGOMERY, D. C. et al. **Introduction to Time Series Analysis and Forecasting**. Second Edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2016.

IOANNOU, I. et al. Process modelling and life cycle assessment coupled with experimental work to shape the future sustainable production of chemicals and fuels. *REACTION CHEMISTRY & ENGINEERING*, v. 6, n. 7, p. 1179, 2021.

ILO - INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION. CHILD LABOUR IN MINING AND GLOBAL SUPPLY CHAINS. Child Labour Platform, 2019.

ISLAM, S.; PONNAMBALAM, S. G.; LAM, H. L. Review on life cycle inventory: methods, examples and applications. *Journal of Cleaner Production*, v. 136, p. 266–278, 2016.

JAAFARZADEH, N. et al. The environmental performance of four municipal solid waste management scenarios: A life cycle assessment study. *Environmental Quality Management*, v. 31, n. 2, p. 77–84, 2021.

JENU, S. et al. Reducing the climate change impacts of lithium-ion batteries by their cautious management through integration of stress factors and life cycle assessment. *Journal of Energy Storage*, v. 27, 2020.

JIN, S. et al. A comprehensive review on the recycling of spent lithium-ion batteries: Urgent status and technology advances. *Journal of Cleaner Production*, v. 340, p. 130535, 2022.

KANDA, W. et al. From circular business models to circular business ecosystems. *Business Strategy and the Environment*, v. 30, n. 6, p. 2814-2829, 2021.K

KANG, D. H. P.; CHEN, M.; OGUNSEITAN, O. A. Potential Environmental and Human Health Impacts of Rechargeable Lithium Batteries in Electronic Waste. *Environmental Science and Technology*, v. 47, n. 10, p. 5495–5503, 2013.

KASULAITIS, B. V. et al. Evolving materials, attributes, and functionality in consumer electronics: Case study of laptop computers. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 100, p. 1–10, 2015.

KAYA, M. Industrial-Scale E-Waste/WPCB Recycling Lines. **Minerals, Metals and Materials Series**, p. 177–209, 2019.

KIDDEE, P.; NAIDU, R.; WONG, M. H. Electronic waste management approaches: An overview. **Waste Management**, v. 33, n. 5, p. 1237–1250, 2013.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, conservation and recycling**, v. 127, p. 221–232, 2017.

KOROMA, M. S. et al. Life cycle assessment of battery electric vehicles: Implications of future electricity mix and different battery end-of-life management. **Science of The Total Environment**, v. 831, p. 154859, 2022.

KOYAMPARAMBATH, A. et al. Supply risk evolution of raw materials for batteries and fossil fuels for selected OECD countries (2000–2018). **Resources Policy**, v. 75, p. 102465, 2022.

KURZ, L. et al. Global warming potential of a new waterjet-based recycling process for cathode materials of lithium-ion batteries. **Batteries**, v. 7, n. 2, 2021.

LAROUCHE, F. et al. Progress and Status of Hydrometallurgical and Direct Recycling of Li-Ion Batteries and Beyond. **Materials 2020, Vol. 13, Page 801**, v. 13, n. 3, p. 801, 2020.

LAURENT, A. et al. Review of LCA studies of solid waste management systems – Part II: Methodological guidance for a better practice. **Waste Management**, v. 34, n. 3, p. 589–606, 2013a.

LAURENT, A. et al. Review of LCA studies of solid waste management systems – Part I: Lessons learned and perspectives. **Waste Management**, v. 34, n. 3, p. 573–588, 2013b.

LAURENT, A. et al. Methodological review and detailed guidance for the life cycle interpretation phase. **Journal of Industrial Ecology**, v. 24, n. 5, p. 986–1003, 2020a.

LEI, S.; SUN, W.; YANG, Y. Solvent extraction for recycling of spent lithium-ion batteries. **Journal of Hazardous Materials**, v. 424, p. 127654, 2022.

LEIPOLD, Sina et al. Lessons, narratives and research directions for a sustainable circular economy. 2021.

LI, C. T. et al. Vitrification of chromium electroplating sludge. **Environmental Science and Technology**, v. 41, n. 8, p. 2950–2956, 2007.

LI, J.; WANG, G.; XU, Z. Generation and detection of metal ions and volatile organic compounds (VOCs) emissions from the pretreatment processes for recycling spent lithium-ion batteries. **Waste Management**, v. 52, p. 221–227, 2016.

LIANG, Z. et al. Hydrometallurgical Recovery of Spent Lithium Ion Batteries: Environmental Strategies and Sustainability Evaluation. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 9, n. 17, p. 5750–5767, 2021.

LIN, L.; LU, Z.; ZHANG, W. Recovery of lithium and cobalt from spent Lithium- Ion batteries using organic aqua regia (OAR): Assessment of leaching kinetics and global warming potentials. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 167, 2021.

LIU, Y. E. et al. Bioaccumulation of legacy and emerging organophosphorus flame retardants and plasticizers in insects during metamorphosis. **Journal of Hazardous Materials**, v. 406, p. 124688, 2021.

LYBBERT, M. et al. Integrating life cycle assessment and electrochemical modeling to study the effects of cell design and operating conditions on the environmental impacts of lithium-ion batteries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 144, p. 111004, 2021.

MAIER, S. D. et al. Methodological Approach for the Sustainability Assessment of Development Cooperation Projects for Built Innovations Based on the SDGs and Life Cycle Thinking. **Sustainability 2016, Vol. 8, Page 1006**, v. 8, n. 10, p. 1006, 2016.

MARANGHI, S. et al. Integrating urban metabolism and life cycle assessment to analyse urban sustainability. **Ecological Indicators**, v. 112, 2020.

MCCALLA, E.; JIA, S. Topology to improve battery technology. **Nature Sustainability 2021 5:3**, v. 5, n. 3, p. 181–182, 2021.

MEJAME, P. P. M. et al. Effect of technological developments for smartphone lithium battery on metal-derived resource depletion and toxicity potentials. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 158, p. 104797, 2020.

MESHARAM, P. et al. Environmental impact of spent lithium ion batteries and green recycling perspectives by organic acids – A review. **Chemosphere**, v. 242, p. 125291, 2020.

MOHR, M. et al. Toward a cell-chemistry specific life cycle assessment of lithium-ion battery recycling processes. **Journal of Industrial Ecology**, v. 24, n. 6, p. 1310–1322, 2020.

MOSSALI, E. et al. Lithium-ion batteries towards circular economy: A literature review of opportunities and issues of recycling treatments. **Journal of Environmental Management**, v. 264, p. 110500, 2020.

MROZIK, W. et al. Environmental impacts, pollution sources and pathways of spent lithium-ion batteries. **Energy & Environmental Science**, v. 14, n. 12, p. 6099–6121, 2021.

MULYA, K. S. et al. A systematic review of life cycle assessment of solid waste management: Methodological trends and prospects. **Science of The Total Environment**, v. 831, p. 154903, 2022.

NATURE. Lithium-ion batteries need to be greener and more ethical. **Nature 595**, 7 2021.

NATURE REVIEW MATERIALS. Raw materials for a truly green future. **Nat Rev Mater** 6, 455, 2021.

NEDJALKOV, A. et al. Toxic Gas Emissions from Damaged Lithium Ion Batteries—Analysis and Safety Enhancement Solution. **Batteries** 2016, **Vol. 2, Page 5**, v. 2, n. 1, p. 5, 2016.

NIERO, Monia et al. Combining eco-efficiency and eco-effectiveness for continuous loop beverage packaging systems: lessons from the Carlsberg Circular Community. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 3, p. 742-753, 2017.

NOKERI, T. C. Forecasting Growth. **Econometrics and Data Science**, p. 83–96, 2022.

OBERSTEINER, G. et al. Landfill modelling in LCA – A contribution based on empirical data. **Waste Management**, v. 27, n. 8, p. S58–S74, 2007.

OCMAL - Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina. IMPACTO SOCIOAMBIENTAL DE LA EXTRACCIÓN DE LITIO EN LAS CUENCAS DE LOS SALARES ALTOANDINOS DEL CONO SUR. Investigación y redacción: Bárbara Jerez Henríquez, 2018.

OTTONI, M. et al. **A circular approach to the e-waste valorization through urban mining in Rio de Janeiro, Brazil**. *Journal of Cleaner Production*, v. 261, p. 120990, 2020.

OR, T. et al. Recycling of mixed cathode lithium-ion batteries for electric vehicles: Current status and future outlook. **Carbon Energy**, v. 2, n. 1, p. 6–43, 2020.

PAGNANELLI, F. et al. Leaching of electrodic powders from lithium ion batteries: Optimization of operating conditions and effect of physical pretreatment for waste fraction retrieval. **Waste Management**, v. 60, p. 706–715, 2017.

PEDERSEN, D.; LYBBERT, M.; WARREN, R. Life Cycle Analysis of LiCoO₂/ Graphite Batteries with Cooling using Combined Electrochemical-Thermal Modeling. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 180, p. 106204, 2022.

PETERS, J. F. et al. The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 67, p. 491–506, 2017.

PETERS, J. F.; WEIL, M. Providing a common base for life cycle assessments of Li-Ion batteries. **Journal of Cleaner Production**, v. 171, p. 704–713, 2018.

PETTER, P. M. H.; VEIT, H. M.; BERNARDES, A. M. Evaluation of gold and silver leaching from printed circuit board of cellphones. **Waste Management**, v. 34, n. 2, p. 475–482, 2014.

PRAŽANOVÁ, A.; KNAP, V.; STROE, D. I. Literature Review, Recycling of Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles, Part I: Recycling Technology. **Energies** 2022, **Vol. 15, Page 1086**, v. 15, n. 3, p. 1086, 2022.

PRÉ-SUSTAINABILITY (2022). SIMPARO: Sustainability software for fact-based decisions.

Disponível em: <https://pre-sustainability.com/solutions/tools/simapro/>. Acesso em 20 abr 2022.

QIAO, Q. et al. Electric vehicle recycling in China: Economic and environmental benefits. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 140, p. 45–53, 2019.

RAJ, T. et al. Recycling of cathode material from spent lithium-ion batteries: Challenges and future perspectives. **Journal of Hazardous Materials**, v. 429, p. 128312, 2022.

RAJAEIFAR, M. A. et al. Life cycle assessment of lithium-ion battery recycling using pyrometallurgical technologies. **Journal of Industrial Ecology**, v. 25, n. 6, p. 1560–1571, 2021.

RAJAEIFAR, M. A. et al. Challenges and recent developments in supply and value chains of electric vehicle batteries: A sustainability perspective. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 180, p. 106144, 2022.

RASHEED, R. et al. Analysis of environmental sustainability of e-waste in developing countries — a case study from Pakistan. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 24, p. 36721–36739, 2022.

REAP, J. et al. A survey of unresolved problems in life cycle assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment** 2008 13:4, v. 13, n. 4, p. 290–300, 2008.

Recycle spent batteries. **Nature Energy** 2019 4:4, v. 4, n. 4, p. 253–253, 2019.

REY, I. et al. Environmental Impacts of Graphite Recycling from Spent Lithium-Ion Batteries Based on Life Cycle Assessment. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 9, n. 43, p. 14488–14501, 2021.

RHEE, S. W.; JANG, Y. C.; KIM, J. Y. Editorial: Challenges on end-of-life battery recycling of electric vehicles. **Waste Management**, v. 135, p. 327–328, 2021.

RICHA, K. et al. A future perspective on lithium-ion battery waste flows from electric vehicles. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 83, p. 63–76, 2014.

RIGAMONTI, L.; GROSSO, M.; SUNSERI, M. C. Influence of assumptions about selection and recycling efficiencies on the LCA of integrated waste management systems. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 14, n. 5, p. 411–419, 2009.

RIGAMONTI, L.; MANCINI, E. Life cycle assessment and circularity indicators. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 26, n. 10, p. 1937–1942, 2021.

RINNE, M.; ELOMAA, H.; LUNDSTRÖM, M. Life cycle assessment and process simulation of prospective battery-grade cobalt sulfate production from Co-Au ores in Finland. **The International Journal of Life Cycle Assessment** 2021, v. 1, p. 1–16, 2021.

ROCHA, T. B.; PENTEADO, C. S. G. Life cycle assessment of a small WEEE reverse logistics system: Case study in the Campinas Area, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 314, p. 128092, 2021.

ROSSI, E. et al. Circular economy indicators for organizations considering sustainability and business models: Plastic, textile and electro-electronic cases. **Journal of Cleaner Production**, v. 247, p. 119137, 2020.

SADHUKHAN, J.; CHRISTENSEN, M. An In-Depth Life Cycle Assessment (LCA) of Lithium-Ion Battery for Climate Impact Mitigation Strategies. **Energies 2021, Vol. 14, Page 5555**, v. 14, n. 17, p. 5555, 2021.

SALA, S. et al. Implications of LCA and LCIA choices on interpretation of results and on decision support. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, n. 12, p. 2311–2314, 2020a.

SALA, S. et al. Implications of LCA and LCIA choices on interpretation of results and on decision support. **The International Journal of Life Cycle Assessment 2020 25:12**, v. 25, n. 12, p. 2311–2314, 2020b.

SANFÉLIX, J. et al. Environmental and Economic Performance of an Li-Ion Battery Pack: A Multiregional Input-Output Approach. **Energies 2016, Vol. 9, Page 584**, v. 9, n. 8, p. 584, 27 jul. 2016.

SANTILLÁN-SALDIVAR, J. et al. How recycling mitigates supply risks of critical raw materials: Extension of the geopolitical supply risk methodology applied to information and communication technologies in the European Union. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 164, p. 105108, 2021a.

SANTILLÁN-SALDIVAR, J. et al. Design of an endpoint indicator for mineral resource supply risks in life cycle sustainability assessment: The case of Li-ion batteries. **Journal of Industrial Ecology**, v. 25, n. 4, p. 1051–1062, 2021b.

SANYÉ-MENGUAL, E.; SALA, S. Life Cycle Assessment support to environmental ambitions of EU policies and the Sustainable Development Goals. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 00, p. 0–1, 2022.

SCHAUBROECK, T. et al. Attributional & Consequential Life Cycle Assessment: Definitions, Conceptual Characteristics and Modelling Restrictions. **Sustainability 2021, Vol. 13, Page 7386**, v. 13, n. 13, p. 7386, 2021.

SCHAUBROECK, T.; RUGANI, B. A Revision of What Life Cycle Sustainability Assessment Should Entail: Towards Modeling the Net Impact on Human Well-Being. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 6, p. 1464–1477, 2017.

SCHEEPENS, A. E.; VOGTLÄNDER, J. G.; BREZET, J. C. Two life cycle assessment (LCA) based methods to analyse and design complex (regional) circular economy systems. Case: Making water tourism more sustainable. **Journal of Cleaner Production**, v. 114, p. 257-268, 2016.

SCHULER, D. et al. Social, economic and environmental challenges in primary lithium and cobalt sourcing for the rapidly increasing electric mobility sector. European Policy Brief:

Strategic Dialogue on Sustainable Raw Materials for Europe (STRADE), 06, 2018

SCROSATI, B.; HASSOUN, J.; SUN, Y.-K. Lithium-ion batteries. A look into the future. **Energy & Environmental Science**, v. 4, n. 9, p. 3287–3295, 2011.

SETHURAJAN, M. et al. Recent advances on hydrometallurgical recovery of critical and precious elements from end of life electronic wastes - a review. <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1540760>, v. 49, n. 3, p. 212–275, 2019.

SHAO, L.; KOU, W.; ZHANG, H. The evolution of the global cobalt and lithium trade pattern and the impacts of the low-cobalt technology of lithium batteries based on multiplex network. **Resources Policy**, v. 76, p. 102550, 2022.

SHEKHAR, A. R.; PAREKH, M. H.; POL, V. G. Worldwide ubiquitous utilization of lithium-ion batteries: What we have done, are doing, and could do safely once they are dead? **Journal of Power Sources**, v. 523, p. 231015, 2022.

SHITTU, O. S.; WILLIAMS, I. D.; SHAW, P. J. The ‘WEEE’ challenge: Is reuse the “new recycling”? **Resources, Conservation and Recycling**, v. 174, p. 105817, 2021.

SOMMERVILLE, R. et al. A qualitative assessment of lithium ion battery recycling processes. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 165, p. 105219, 2021.

SONG, J. et al. Material flow analysis on critical raw materials of lithium-ion batteries in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 215, p. 570–581, 2019.

SONG, X. et al. Estimation of Waste Battery Generation and Analysis of the Waste Battery Recycling System in China. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 1, p. 57–69, 1 fev. 2017.

SOUZA, R. G. et al. Sustainability assessment and prioritisation of e-waste management options in Brazil. **Waste Management**, v. 57, p. 46–56, 2016.

STATISTAa. Global notebook personal computer (PC) shipments from 2010 to 2026, 2022. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/269048/worldwide-portable-pc-shipment-forecast/>. Acesso em: 20 abr 2022.

STATISTAb. Global smartphone shipments forecast from 2010 to 2022, 2022. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/263441/global-smartphone-shipments-forecast/>. Acesso em 10 ago 2022.

STATISTAc. Global Demand Battery by region, 2022. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/1103229/global-battery-demand-by-region-forecast/>. Acesso em 10 jan 2022.

STUCKI, M. et al. How life cycle–based science and practice support the transition towards a sustainable economy. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 26, n. 5, p. 1062–1069, 2021.

SUH, S.; HUPPES, G. Methods for Life Cycle Inventory of a product. **Journal of Cleaner**

Production, v. 13, n. 7, p. 687–697, 2005.

SUN, S.; ERTZ, M. Life cycle assessment and Monte Carlo simulation to evaluate the environmental impact of promoting LNG vehicles. **MethodsX**, v. 7, p. 101046, 2020.

SWART, P.; DEWULF, J.; BIERNAUX, A. Resource demand for the production of different cathode materials for lithium ion batteries. **Journal of Cleaner Production**, v. 84, n. 1, p. 391–399, 2014.

TAPANINAHO, R.; HEIKKINEN, A. Value creation in circular economy business for sustainability: A stakeholder relationship perspective. *Business Strategy and the Environment*, 2022.

THIES, C. et al. Assessment of social sustainability hotspots in the supply chain of lithium-ion batteries. **Procedia CIRP**, v. 80, p. 292–297, 2019.

TREFFER, F. Lithium-ion battery recycling. **Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications**, p. 325–333, 2018.

TURNER, D. A.; WILLIAMS, I. D.; KEMP, S. Greenhouse gas emission factors for recycling of source-segregated waste materials. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 105, p. 186–197, 2015.

TURNER, D. A.; WILLIAMS, I. D.; KEMP, S. Combined material flow analysis and life cycle assessment as a support tool for solid waste management decision making. **Journal of Cleaner Production**, v. 129, p. 234–248, 2016.

VANDEPAER, L.; CLOUTIER, J.; AMOR, B. Environmental impacts of Lithium Metal Polymer and Lithium-ion stationary batteries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, p. 46–60, 2017.

VARBANOV, P. S. et al. Comparative Life Cycle Assessment of three Recycling Approaches for Electric Vehicle Lithium-ion Battery after Cascaded Use. **CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS**, v. 81, p. 2020, 2020.

WANG, D. et al. Assessing the transition of municipal solid waste management by combining material flow analysis and life cycle assessment. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 177, p. 105966, 2022.

WANG, F.; YU, L.; WU, A. Forecasting the electronic waste quantity with a decomposition-ensemble approach. **Waste Management**, v. 120, p. 828–838, 2021.

WANG, X.-C. et al. Extended water-energy nexus contribution to environmentally-related sustainable development goals. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 150, 2021.

WANG, X.; GAUSTAD, G.; BABBITT, C. W. Targeting high value metals in lithium-ion battery recycling via shredding and size-based separation. **Waste Management**, v. 51, p. 204–213, 2016.

WEIDEMA, B. P. Consistency check for life cycle assessments. **The International Journal of Life Cycle Assessment** **2018** **24:5**, v. 24, n. 5, p. 926–934, 2018.

WENTKER, M. et al. A raw material criticality and environmental impact assessment of state-of-the-art and post-lithium-ion cathode technologies. **Journal of Energy Storage**, v. 26, p. 101022, 2019.

WINSLOW, K. M.; LAUX, S. J.; TOWNSEND, T. G. A review on the growing concern and potential management strategies of waste lithium-ion batteries. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 129, p. 263–277, 2018.

WOLF, M. J. et al. (2022). 2022 Environmental Performance Index. New Haven, CT: Yale Center for Environmental Law & Policy. epi.yale.edu

XAVIER, L. H. et al. Sustainability and the circular economy: A theoretical approach focused on e-waste urban mining. **Resources Policy**, v. 74, p. 101467, 2021.

XU, C. et al. Future material demand for automotive lithium-based batteries. **Communications Materials** **2020** **1:1**, v. 1, n. 1, p. 1–10, 2020a.

XU, Z. et al. Impacts of irrigated agriculture on food–energy–water–CO₂ nexus across metacoupled systems. **Nature Communications**, v. 11, n. 1, 2020b.

YU, D. et al. Pretreatment options for the recycling of spent lithium-ion batteries: A comprehensive review. **Minerals Engineering**, v. 173, p. 107218, 2021.

ZAIKOVA, A. et al. Life Cycle Assessment of Existing and Alternative Options for Municipal Solid Waste Management in Saint Petersburg and the Leningrad Region, Russia. **Recycling**, v. 7, n. 2, p. 19, 2022.

ZENG, A. et al. Battery technology and recycling alone will not save the electric mobility transition from future cobalt shortages. **Nature Communications** **2022** **13:1**, v. 13, n. 1, p. 1–11, 2022.

ZHAO, E. et al. Assessing the life cycle cumulative energy demand and greenhouse gas emissions of lithium-ion batteries. **Journal of Energy Storage**, v. 43, p. 103193, 2021.

ZHAO, S.; YOU, F. Comparative Life-Cycle Assessment of Li-Ion Batteries through Process-Based and Integrated Hybrid Approaches. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 7, n. 5, p. 5082–5094, 2019.

ZHENG, X. et al. A Mini-Review on Metal Recycling from Spent Lithium Ion Batteries. **Engineering**, v. 4, n. 3, p. 361–370, 2018.

ZUBI, G. et al. The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 89, p. 292–308, 2018.