

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA, CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

CARLA RAFAELLI MARTINS

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO DESEMPENHO AMBIENTAL ENTRE
TECNOLOGIA DE FLUIDO SUPERCRÍTICO E O PROCESSO DE
HIDROMETALURGIA PARA A RECICLAGEM DE BATERIAS DE ÍON LÍTIO**

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

2025

CARLA RAFAELLI MARTINS

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO DESEMPENHO AMBIENTAL ENTRE A
TECNOLOGIA DE FLUIDO SUPERCRÍTICO E O PROCESSO DE
HIDROMETALURGIA PARA A RECICLAGEM DE BATERIAS DE ÍON LÍTIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Interunidades entre o Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba e a Faculdade de Engenharia de São João da Boa Vista da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação.

Financiadora: FAPESP – Proc. Nº 2022/13602-8 e Nº 2020/11874-5. CAPES. CNPq – Proc. 130471/2025-9.

Orientador: Prof. Dr. José Augusto de Oliveira

Coorientadora: Dra. Mirian Paula dos Santos

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

2025

M386a

Martins, Carla Rafaelli

Avaliação comparativa do desempenho ambiental entre a tecnologia de fluido supercrítico e o processo de hidrometalurgia para a reciclagem de baterias de íon lítio / Carla Rafaelli Martins. -- São João da Boa Vista, 2025
87 p. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista

Orientador: José Augusto de Oliveira

Coorientadora: Mirian Paula dos Santos

1. Baterias de lítio. 2. Reaproveitamento. 3. Impacto Ambiental Avaliação.

I. Título.

Impacto potencial desta pesquisa

A pesquisa contribui principalmente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 7, 9, 12 e 13 estabelecidos pela ONU ao avaliar e comparar os impactos ambientais e as taxas de eficiência entre tecnologias de reciclagem de baterias de íon lítio, promovendo o uso eficiente de recursos, a redução de impactos ambientais, a economia circular e o desenvolvimento de processos mais sustentáveis.

Potential impact of this research

The research mainly contributes to Sustainable Development Goals (SDGs) 7, 9, 12, and 13 established by the United Nations by evaluating and comparing the environmental impacts and efficiency rates of lithium-ion battery recycling technologies, promoting resource efficiency, environmental impact reduction, circular economy practices, and the development of more sustainable processes.



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:

Avaliação comparativa do desempenho ambiental entre a tecnologia de fluido supercrítico e o processo de hidrometalurgia para a reciclagem de baterias de íon lítio

AUTORA: CARLA RAFAELLI MARTINS

ORIENTADOR: JOSÉ AUGUSTO DE OLIVEIRA

COORIENTADORA: MIRIAN PAULA DOS SANTOS

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Engenharia Elétrica, área: Automação pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JOSÉ AUGUSTO DE OLIVEIRA (Participação Virtual)

Departamento de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações / UNESP / Câmpus de São João da Boa Vista - FESJBV

Prof. Dr. LÚCIO CARDOZO FILHO (Participação Virtual)

Centro de Tecnologia/Engenharia Química / Universidade Estadual de Maringá (UEM)

Prof. Dr. THIAGO VINÍCIUS BARROS (Participação Virtual)

Departamento de Engenharia Química / Universidade Estadual de Maringá

São João da Boa Vista, 08 de dezembro de 2025.



Verônica Liberali Messias
Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Graduação e Pós-Graduação

Assinado de forma digital
por Verônica Liberali
Messias:36823715839
Dados: 2025.12.09
08:35:52 -03'00'

Dedico este trabalho aos que acreditaram em mim, mesmo quando eu duvidei, e a todos que, entre o cansaço e o sonho, escolhem continuar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me dar forças, resiliência e nunca me abandonar.

Agradeço à minha família, por sempre acreditarem em mim e por todo o carinho e amor. Em especial, aos meus pais Rosalina e José Carlos, que são o principal motivo de eu ter conseguido finalizar este mestrado; ao meu irmão Rafael e à minha cunhada Nádia, pelo apoio constante; aos meus sobrinhos Davi e Mateus, que são a razão da minha vida; ao Whisky, minha calopsita e fiel companheiro em tantas noites em claro; e ao meu namorado André, por ter sido meu parceiro e por sempre me incentivar.

Agradeço aos meus amigos, por estarem sempre ao meu lado, acreditando em mim e tornando os dias mais leves, em especial às minhas amigas da graduação Ana Luísa, Nathália e Stephanie.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. José Augusto de Oliveira e à minha coorientadora, Dra. Mirian Paula dos Santos por toda atenção, paciência e incentivo, por acreditarem no meu potencial e me motivarem a superar meus próprios limites.

Agradeço ao meu grupo de pesquisas, o *Center for Advanced and Sustainable Technologies* (CAST), por todo o apoio, parceria e motivação, em especial à Lana, que foi uma amiga e conselheira essencial nessa jornada.

Agradeço a todos os professores e funcionários, por contribuírem com a minha formação e por agregarem valor à minha vida nos âmbitos profissional e pessoal.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, à qual agradeço.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo nº 2022/13602-8 e Processo nº 2020/11874-5 (Programa de Apoio à Pesquisa em Parceria para Inovação Tecnológica (PITE)), à qual agradeço. As opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas neste material são de responsabilidade do autor e não necessariamente refletem a visão da FAPESP.

Agradeço também a bolsa do Projeto de Pesquisa Inovadora – MAI/DAI – CNPq/UNESP (processo 130471/2025-9) e ao Programa de Aperfeiçoamento e Apoio à Docência no Ensino Superior (PAADES).

“Será que eu já posso enlouquecer, ou devo apenas sorrir?”.

(Pitty, “Me Adora”)

RESUMO

As baterias de íon lítio (do inglês *lithium ion batteries* – LIBs) têm sido um objeto de pesquisa relevante devido à sua grande notoriedade em vários setores tecnológicos e econômicos. Amplamente utilizadas em eletrônicos, fontes estacionárias de energia e equipamentos de telecomunicações, as LIBs assumem um papel essencial e estratégico na eletromobilidade e no processo de transição do uso de fontes fósseis para o uso de energias renováveis. O aumento da demanda observado e projetado para as LIBs e a escassez dos metais que as compõem, como lítio (Li), cobalto (Co), níquel (Ni), manganês (Mn), cobre (Cu) e alumínio (Al), chama a atenção de vários setores produtivos e intensificam o interesse por soluções de reciclagem. Neste contexto, a reciclagem de LIBs se apresenta como a principal estratégia de fim de vida (*end of life* – EoL) para prevenção e redução de impactos ambientais, bem como para a sustentabilidade econômica das cadeias produtivas que utilizam as LIBs. Desta forma, por meio da reprodução de experimentos e da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), este trabalho avaliou comparativamente o desempenho ambiental entre duas tecnologias de reciclagem: hidrometalurgia e tecnologia de água supercrítica. Adicionalmente, os impactos ambientais evitados foram avaliados. Os resultados indicaram que a hidrometalurgia apresenta menores impactos ambientais e maior eficiência quando comparada à tecnologia de água supercrítica. Essa diferença está associada principalmente ao elevado consumo de energia e à utilização do Policloreto de Vinila (PVC) na rota supercrítica. A análise permitiu identificar os pontos críticos em que ações podem ser tomadas para melhorar a performance ambiental de cada tecnologia, como a redução do consumo energético.

Palavras-chave: baterias de íon lítio; reciclagem; avaliação do ciclo de vida (ACV); hidrometalurgia; água supercrítica.

ABSTRACT

Lithium-ion batteries (LIBs) have been a relevant research topic due to their growing prominence in various technological and economic sectors. Widely used in electronics, stationary energy storage systems, and telecommunications equipment, LIBs play an essential and strategic role in electromobility and in the process of migrating from the use of fossil fuels to the use of renewable energies. The observed and projected increase in demand for LIBs and the scarcity of the metals that compose them, such as lithium (Li), cobalt (Co), nickel (Ni), manganese (Mn), copper (Cu), and aluminum (Al), has drawn the attention of several productive sectors and intensified interest in recycling solutions. In this context, LIB recycling emerges as the main end-of-life (EoL) strategy for preventing and reducing environmental impacts, as well as for the economic sustainability of production chains that use LIBs. Thus, through experimental reproduction and Life Cycle Assessment (LCA), this study comparatively evaluated the environmental performance between two recycling technologies: hydrometallurgy and supercritical water technology. Additionally, the avoided environmental impacts were assessed. The results indicate that hydrometallurgy shows lower environmental impacts when compared to supercritical water technology. This difference is mainly due to high energy consumption and the use of Polyvinyl Chloride (PVC) in the supercritical route. The analysis also allowed the identification of critical points where targeted actions can be taken to improve the environmental performance of each technology, such as reducing energy consumption.

Keywords: lithium-ion batteries; recycling; life cycle assessment (LCA); hydrometallurgy; supercritical water.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Visão geral do sistema de produto das tecnologias de reciclagem de LIB.....	19
Figura 2 - Etapas para separação dos materiais catódicos e anódicos na hidrometalurgia	24
Figura 3 - Aparato experimental para oxidação por fluido supercrítico em LIBs.....	26
Figura 4 - Sistema de produto do processo hidrometalúrgico	28
Figura 5 - Sistema de produto do processo utilizando água supercrítica	29
Figura 6 - Processo de descarga qualitativo completo.	32
Figura 7 - Processo de reciclagem hidrometalúrgica qualitativo completo.....	33
Figura 8 - Processo de reciclagem utilizando água supercrítica qualitativo completo.....	37
Figura 9 - Processo e resultados da RBS Roadmap	46
Figura 10 - Nuvem de Palavras da Busca 3	47
Figura 11 - Produções Científicas Anuais da Busca 3.....	48
Figura 12 - Produção Científica por País da Busca 3	48
Figura 13 - Frequência das Palavras ao longo do Tempo da Busca 3	49
Figura 14 - Nuvem de Palavras da Busca 4.....	50
Figura 15 - Produções Científicas Anuais da Busca 4.....	50
Figura 16 - Produções Científica por País da Busca 4	51
Figura 17 - Frequência das Palavras ao longo do Tempo da Busca 4.....	51
Figura 18 - Contribuições relativas de cada processo da hidrometalurgia por categoria de impacto ambiental.....	53
Figura 19 - Contribuições relativas do processo de descarga para cada categoria de impacto ambiental	54
Figura 20 - Contribuições relativas do processo de abertura da hidrometalurgia para cada categoria de impacto ambiental	55
Figura 21 - Contribuições relativas do processo de reciclagem do ânodo da hidrometalurgia para cada categoria de impacto ambiental.....	56
Figura 22 - Contribuições relativas do processo de reciclagem do cátodo da hidrometalurgia para cada categoria de impacto ambiental.....	57
Figura 23 - Contribuições relativas do processo de reciclagem do plástico da hidrometalurgia para cada categoria de impacto ambiental.....	58
Figura 24 - Contribuições relativas do processo de separação do metal da hidrometalurgia para cada categoria de impacto ambiental.....	59
Figura 25 - Contribuições relativas de cada processo da tecnologia de água supercrítica por categoria de impacto ambiental	60
Figura 26 - Contribuições relativas dos processos preliminares de abertura e pré-experimento da tecnologia de água supercrítica para cada categoria de impacto ambiental	61
Figura 27 - Contribuições relativas do processo experimental da tecnologia de água supercrítica para cada categoria de impacto ambiental.....	62
Figura 28 - Impactos ambientais normalizados por processo.....	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Listagem de palavras-chave	22
Quadro 2 - Critérios de Inclusão.....	23
Quadro 3 - Artigos selecionados pela Revisão Bibliográfica Sistemática	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Conversões da massa dos materiais da célula LCO.	29
Tabela 2 - Proporção de materiais	30
Tabela 3 - Dados dos equipamentos - Processo de Descarga.....	32
Tabela 4 - Inventário do Ciclo de Vida do Processo de Descarga de LIBs.....	33
Tabela 5 - Dados dos equipamentos - Reciclagem Hidrometalúrgica.....	34
Tabela 6 - Parte 1 do ICV do Processo de Reciclagem de LIBs utilizando a Hidrometalurgia.	35
Tabela 7 - Parte 2 do ICV do Processo de Reciclagem de LIBs utilizando a Hidrometalurgia.	36
Tabela 8 - Dados dos equipamentos - Reciclagem com água supercrítica.....	37
Tabela 9 - Parte 1 do ICV do Processo de Reciclagem de LIBs utilizando a Tecnologia de Água Supercrítica.	38
Tabela 10 - Parte 2 do ICV do Processo de Reciclagem de LIBs utilizando a Tecnologia de Água Supercrítica.	39
Tabela 11 - Concentrações dos produtos finais	40
Tabela 12 - Massa dos produtos obtidos (gasoso).....	41
Tabela 13 – Categorias de impacto ambiental do método ReCiPe 2016 v1.1 <i>Midpoint</i> (H) ...	43
Tabela 14 - Taxas de eficiência de recuperação dos produtos das LIBs	52
Tabela 15 - Valores de impactos ambientais das tecnologias analisadas em cada categoria do método ReCiPe 2016 <i>Midpoint</i> (H).....	53
Tabela 16 - Valores normalizados e da avaliação tecno-ambiental para as tecnologias de reciclagem.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
AP	Acidificação Terrestre (do inglês, <i>Terrestrial Acidification</i>)
BGR	Instituto Federal Alemão de Geociências e Recursos Naturais (do alemão, <i>Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe</i>)
BR	Brasil
CAST	<i>Center for Advanced and Sustainable Technologies</i>
DE	Alemanha (do alemão, <i>Deutschland</i>)
DEs	Solventes Eutéticos Profundos (do inglês, <i>Deep Eutectic Solvents</i>)
DoE	Planejamento de Experimentos (do inglês, <i>Design of Experiments</i>)
EoL	Fim de Vida (do inglês, <i>End of Life</i>)
ETPfw	Ecotoxicidade da Água Doce (em inglês, <i>Freshwater Ecotoxicity</i>)
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FDP	Depleção de Recursos Fósseis (do inglês, <i>Fossil Depletion</i>)
FEM	Fórum Econômico Mundial
FEP	Eutrofização da Água Doce (do inglês, <i>Freshwater Eutrophication</i>)
FWC	Consumo de Água Doce (do inglês, <i>Freshwater Consumption</i>)
GLO	Global
GWP	Aquecimento Global (do inglês, <i>Global Warming Potential</i>)
HOFPeco	Formação de Ozônio Fotoquímico, Ecossistemas (do inglês, <i>Photochemical Ozone Formation, Ecosystems</i>)
HOFPhh	Formação de Ozônio Fotoquímico, Saúde Humana (do inglês, <i>Photochemical Ozone Formation, Human Health</i>)
HTPc	Toxicidade Humana, carcinogênica (do inglês, <i>Human Toxicity, câncer</i>)
HTPnc	Toxicidade Humana, não carcinogênica (do inglês, <i>Human Toxicity, non-cancer</i>)
ICV	Inventário do Ciclo de Vida

ILs	Líquidos Iônicos (do inglês, <i>Ionic Liquids</i>)
IRP	Radiação Ionizante (do inglês, <i>Ionizing Radiation</i>)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LCO	Óxido de Lítio Cobalto (LiCoO ₂)
LIB	Bateria de Íon Lítio (do inglês, <i>Lithium-Ion Battery</i>)
LOP	Uso do Solo (do inglês, <i>Land Use</i>)
MDP	Depleção de Metais (do inglês, <i>Metal Depletion</i>)
MEP	Eutrofização Marinha (do inglês, <i>Marine Eutrophication</i>)
METP	Ecotoxicidade Marinha (do inglês, <i>Marine Ecotoxicity</i>)
NMC	Óxido de Lítio, Cobalto, Níquel e Manganês (LiNi _{0.33} Mn _{0.33} Co _{0.33} O ₂)
ODP	Depleção da Camada de Ozônio Estratosférico (do inglês, <i>Stratospheric Ozone Depletion</i>)
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PMFP	Formação de Material Particulado (do inglês, <i>Fine Particulate Matter Formation</i>)
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RBS	Revisão Bibliográfica Sistemática
REEE	Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos
RER	Resto da Europa (do inglês, <i>Rest of Europe</i>)
ROW	Resto do Mundo (do inglês, <i>Rest of the World</i>)
SCW	Água Supercrítica (do inglês, <i>Supercritical Water</i>)
SCWO	Oxidação em Água Supercrítica (do inglês, <i>Supercritical Water Oxidation</i>)
TETP	Ecotoxicidade Terrestre (do inglês, <i>Terrestrial Ecotoxicity</i>)
UPLCI	Inventário de Processo Unitário do Ciclo de Vida (do inglês, <i>Unit Process Life Cycle Inventory</i>)
US	Estados Unidos (do inglês, <i>United States</i>)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	20
3	MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1	Revisão da Literatura	21
3.2	Reprodução dos experimentos	24
3.3	Avaliação do Ciclo de Vida	27
3.3.1	<i>Objetivo e Escopo</i>	27
3.3.2	<i>Inventário do Ciclo de Vida</i>	29
3.3.3	<i>Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida</i>	42
3.4	Análise Tecno-Ambiental	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1	Revisão da Literatura	44
4.2	Reprodução dos experimentos	52
4.3	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida	52
4.4	Análise Tecno-Ambiental	63
5	CONCLUSÃO	66
	REFERÊNCIAS	67
	APÊNDICE A: Processos de entrada e saída	77
	APÊNDICE B: Fluxos de entrada e saída	78
	APÊNDICE C: Contribuições relativas - processo de descarga	80
	APÊNDICE D: Contribuições relativas - processo de abertura da hidrometalurgia	81
	APÊNDICE E: Contribuições relativas - reciclagem do ânodo da hidrometalurgia	82
	APÊNDICE F: Contribuições relativas - reciclagem do cátodo da hidrometalurgia	83
	APÊNDICE G: Contribuições relativas - reciclagem do plástico da hidrometalurgia	84
	APÊNDICE H: Contribuições relativas - separação do metal da hidrometalurgia	85
	APÊNDICE I: Contribuições relativas - processos preliminares da água supercrítica	86
	APÊNDICE J: Contribuições relativas - processo experimental da água supercrítica	87

1 INTRODUÇÃO

O uso de baterias de íon lítio (do inglês, *lithium ion battery* – LIB) apresenta um crescimento exponencial na atualidade. Reconhecida pelo Prêmio Nobel de Química em 2019, este tipo de bateria é versátil, leve e possui altas densidade e capacidade energética e elevada velocidade de recarga, além de apresentar menor potencial de impacto ambiental em seu ciclo de vida quando comparada a baterias baseadas em outras tecnologias, como as baterias de chumbo-ácido (FEM, 2019; Smith, 2020; Habib; Hansdótti; Habib, 2020).

Por estas e outras razões, as LIBs são amplamente utilizadas em equipamentos eletrônicos, de telecomunicações e de fontes estacionárias de energia. Além disso, são consideradas como um dos principais meios para a transição da matriz energética fóssil para a elétrica no setor de transportes (FEM, 2019; Smith, 2020; An, 2020), que inclui veículos automotivos, motocicletas, patinetes, ônibus, aviões, entre outros.

As LIBs são empregadas em diversos setores econômicos mundiais, gerando uma alta demanda que resulta no aumento do consumo do lítio (Li) (Alessia *et al.*, 2021). Segundo o Instituto Federal Alemão de Geociências e Recursos Naturais (BGR), a procura é para suprir a demanda de consumo exercida pelos equipamentos eletrônicos, pelas fontes de energia renováveis, como solar e eólica, e pela eletrificação dos meios de transporte (BGR, 2019). O Fórum Econômico Mundial (FEM, 2023), enfatiza que em 2021, a demanda global por lítio foi de 500.000 toneladas e estimou uma projeção de 3 a 4 milhões de toneladas até 2030.

Além do lítio, a produção de LIBs é dependente da oferta de metais críticos, como o cobalto (Co), o alumínio (Al), o cobre (Cu), o ferro (Fe), o manganês (Mn), o níquel (Ni), dentre outros (Habib; Hansdótti; Habib, 2020). Estes metais possuem fontes naturais limitadas e algumas delas com escassez já definidas. Além disso, alguns destes metais são obtidos como subprodutos da mineração de outros produtos, como por exemplo o Co que, em geral, é um subproduto da mineração do Ni e/ou do Cu (Mayyas; Steward; Mann, 2019).

Após o fim de vida (do inglês, *End of Life* – EoL), o descarte inadequado das baterias pode desencadear impactos ambientais significativos (Harper *et al.*, 2019). Sendo assim, o fechamento do ciclo de vida das LIBs é essencial tanto para que diversos setores alcancem a sustentabilidade econômica quanto para o cumprimento dos objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS) estabelecidos na Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU) (ONU, 2015), promovendo a transição para a Economia Circular em escala global.

Existem diferentes estratégias de fim de vida do produto, no entanto, após esgotadas as possibilidades, a reciclagem é uma das estratégias de EoL que inevitavelmente deverá ser realizada para a gestão dos resíduos sólidos e para a Economia Circular como previsto na Diretiva da União Europeia (UE) de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) (UE, 2012), na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (Brasil, 2010) e no acordo setorial firmado entre o Ministério do Meio Ambiente e as empresas produtoras de equipamentos eletrônicos, incluindo baterias (Brasil, 2019).

As tecnologias de reciclagem de LIBs podem ser amplamente classificadas em métodos convencionais e não convencionais. Entre as convencionais, destacam-se a pirometalurgia, a hidrometalurgia e a reciclagem direta (Sofian *et al.*, 2025; Milian *et al.*, 2024). A pirometalurgia envolve processos sob alta temperatura empregados para fundir e separar componentes metálicos (Wiszniewski *et al.*, 2025), enquanto a hidrometalurgia baseia-se na lixiviação de metais utilizando soluções químicas e na recuperação seletiva de metais (Santos *et al.*, 2021). Por outro lado, a reciclagem direta envolve a separação física e a regeneração de componentes funcionais da bateria, como os materiais ativos do cátodo, por meio de etapas como delaminação, remoção de impurezas e restauração da estrutura cristalina, visando preservar a estrutura dos materiais catódicos com o mínimo de processamento (Zhang; Zhu, 2024; Natarajan; Noda, 2025).

As tecnologias não convencionais ainda estão em desenvolvimento e teste, com maior ênfase na sustentabilidade ambiental. Estas incluem o uso de fluidos supercríticos (Wang *et al.*, 2023; Barros *et al.*, 2024^a), bio-hidrometalurgia (Wiszniewski *et al.*, 2025; Naseri *et al.*, 2023), separação por membrana (Pandit *et al.*, 2025; Li *et al.*, 2025) e a utilização de líquidos iônicos (ILs) e de solventes eutéticos profundos (DESS) (Milian *et al.*, 2024; Fan *et al.*, 2023; Schiavi *et al.*, 2021). Essas abordagens emergentes buscam minimizar a geração de resíduos e o uso de produtos químicos, além de aumentar a seletividade na recuperação de metais.

Entre as tecnologias convencionais, destaca-se a hidrometalurgia (Shi; Zhang; Ou, 2025) enquanto, entre as não convencionais, o uso de fluidos supercríticos, especialmente a água, conhecida como solvente universal, tem ganhado destaque (Chen *et al.*, 2022). Ambas as tecnologias apresentam como diferencial o menor potencial de impacto ambiental e abrangem todo o processo, desde o descarte de LIBs em fim de vida até a recuperação de óxidos metálicos e/ou metais constituintes das células, visando sua reinserção em um novo ciclo de vida de um novo produto. Além disso, essas tecnologias apresentam grande potencial para implementação

em escala industrial no futuro (Santos *et al.*, 2021; Souza *et al.*, 2022; Barros *et al.*, 2024^a; Barros *et al.*, 2024^b).

A hidrometalurgia pode ser idealizada para empregar reagentes de menor toxicidade em baixas concentrações (Sambamurthy, Raghuvanshi e Sangwan, 2021), apresentando taxas de recuperação de materiais ativos superiores a 90% para células de óxido de lítio e cobalto (LiCoO₂ ou LCO) (com 98% de pureza de cilíndrico e 80% de prismático) e 80% para células de óxido de lítio níquel cobalto e manganês (LiNi_xCo_yMn_zO₂, ou NMC) (com 85% de pureza) (Santos *et al.*, 2021). As taxas de recuperação, aliadas ao uso de reagentes com baixa emissão de gases tóxicos, preveem um alto potencial de escalabilidade industrial, justificado pelo baixo custo operacional, baixo potencial de impacto ambiental negativo, à manipulação simples dos reagentes e ao reduzido risco de acidentes de trabalho graves. Além disso, todos os subprocessos podem ser projetados seguindo os princípios da Economia Circular.

Por outro lado, a água em estado supercrítico possui a vantagem de ser considerada um solvente de menor potencial de impacto ambiental, em contraposição aos solventes orgânicos e/ou ácidos inorgânicos usados em alguns processos hidrometalúrgicos. No estado supercrítico (Temperatura > 374 °C e Pressão > 22 MPa), as propriedades termofísicas da água permitem a decomposição de compostos orgânicos e lixiviação de íons inorgânicos, facilitando a recuperação de metais valiosos (Souza *et al.*, 2022). Além disso, é possível alcançar altas taxas de recuperação de metais e alta eficiência de oxidação para reações orgânicas (Li; Xu, 2019).

Ambas as tecnologias possuem taxas de recuperação e pureza ligeiramente diferentes em escala laboratorial, mas que podem ser expressivas em escala industrial. Ainda assim, apesar de serem mencionadas como tecnologias com bons desempenhos ambientais, estudos que exploram esse tema ainda não foram publicados na literatura científica. Na hidrometalurgia, há o uso de substâncias potencialmente perigosas, como ácidos fortes (por exemplo, H₂SO₄ e HCl) e agentes oxidantes, bem como à geração de efluentes que requerem tratamento adequado. Esses fatores contribuem para a toxicidade aquática, o risco de contaminação do solo e da água e o consumo intensivo de água (Chen *et al.*, 2023). A tecnologia baseada em água supercrítica, por sua vez, implica em alto consumo de energia necessária para alcançar as condições supercríticas, o que pode levar a impactos ambientais significativos, dependendo da fonte de energia utilizada (Li; Xu, 2019). Além disso, o processo requer materiais e equipamentos resistentes à corrosão e à alta pressão, cuja produção e manutenção também contribuem para aumentar a pegada ambiental do sistema (Li *et al.*, 2021). A geração de resíduos sólidos e a

presença de subprodutos inorgânicos no efluente também representam aspectos ambientais relevantes que precisam ser considerados no projeto, operação e gerenciamento da tecnologia.

Nesse contexto e alinhado com os princípios da economia circular, torna-se essencial avaliar e comparar os impactos ambientais e a eficiência de recuperação de materiais associados a diferentes rotas tecnológicas de reciclagem. O desempenho ambiental aumenta à medida que os indicadores de impactos são reduzidos e, de forma complementar, o desempenho técnico dos processos melhora com o crescimento de seus indicadores de eficiência. Uma das principais abordagens para a análise comparativa desses desempenhos é a denominada análise tecno-ambiental (Corona *et al.*, 2018).

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), padronizada pela ISO 14040 (2009), é uma ferramenta amplamente utilizada para quantificar os impactos ambientais associados a processos, produtos ou serviços. A ACV permite a compilação e avaliação de entradas, saídas e impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida, permitindo identificar oportunidades para a melhoria do desempenho ambiental de produtos em diferentes pontos de seus ciclos de vida.

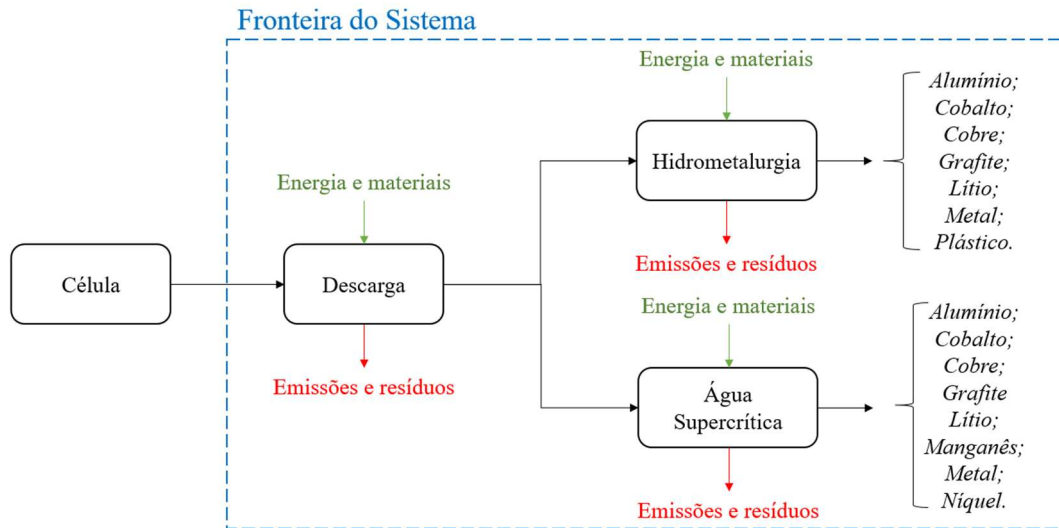
Em conjunto, pode-se utilizar a avaliação da ecoeficiência definida pela ISO 14045 (2014) como um processo que estuda os impactos ambientais em conjunto com o valor de um sistema de produto, para auxiliar empresas e organizações a tomarem decisões utilizando a ACV, adaptando-a para a avaliação tecno-ambiental, de forma que um indicador é adotado para combinar uma métrica técnica de eficiência do processo e o seu impacto ambiental agregado para avaliar as opções tecnológicas disponíveis.

Para tal avaliação, é necessário que se defina um sistema de produto, que diz respeito ao conjunto de processos elementares, com fluxos elementares e de produto que desempenham uma ou mais funções definidas e modelam o ciclo de vida de um produto (ISO 14040, 2009). Para a reciclagem de uma LIB por hidrometalurgia ou tecnologia de água supercrítica, tem-se o sistema de produto apresentado na Figura 1 que representa um modelo geral. Por sua vez, o valor do sistema de produto pode abranger valor funcional, monetário, estético ou outros aspectos, sobre os benefícios e experiências atribuídos a um produto, considerando todo o seu sistema (ISO 14045, 2014).

A reciclagem das LIBs é imprescindível para a autonomia de diversas tecnologias contemporâneas e para a gestão ambientalmente segura dessas baterias em fim de vida. Dada esta importância para o fechamento do seu ciclo de vida e para a Economia Circular, e

considerando a escassez de estudos e trabalhos científicos que avaliem esses processos de forma sistemática e estruturada, dentro dos princípios delimitados, este trabalho apresenta um potencial de contribuição teórica e prática para um tema relevante e atual de pesquisa.

Figura 1 - Visão geral do sistema de produto das tecnologias de reciclagem de LIB



Fonte: elaborado pela própria autora.

Assim, a questão de pesquisa que norteou este trabalho foi: Entre duas tecnologias, uma baseada em hidrometalurgia e outra em tecnologia de água supercrítica, qual apresenta desempenho ambiental e eficiência técnica superior?

Para responder à pergunta, o restante deste trabalho foi organizado em 5 capítulos. O primeiro sendo esta introdução, o Capítulo 2, no qual são apresentados os objetivos, e o Capítulo 3 composto pela metodologia. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos e as discussões e o Capítulo 5 as conclusões deste trabalho, finalizando com as referências utilizadas.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho de mestrado foi avaliar comparativamente a eficiência técnica e o desempenho ambiental de duas tecnologias para a reciclagem de LIBs, uma baseada em hidrometalurgia e outra fundamentada em água supercrítica.

Para isso, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- i. Reproduzir¹ os experimentos para os processos de hidrometalurgia para a reciclagem de LIBs;
- ii. Reproduzir² os experimentos para os processos de tecnologia de água supercrítica para a reciclagem de LIBs;
- iii. Definir os processos-padrão³ que representam cada uma das tecnologias.
- iv. Coletar dados do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) dos processos;
- v. Avaliar as taxas de eficiência de recuperação dos metais resultantes pelos processos de cada tecnologia; e
- vi. Avaliar os indicadores de desempenho ambiental dos processos de cada tecnologia.

¹ Os processos já foram desenvolvidos pelo CAST, foram reproduzidos para aprendizado e coleta do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) com fonte primária de dados.

² Os processos já foram desenvolvidos pelo CAST, foram reproduzidos para aprendizado e coleta do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) com fonte primária de dados.

³ Processos-padrão possuem menores variâncias de parâmetros e podem representar os processos estudados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Devido à diversidade da natureza das atividades deste trabalho, caracterizado por forte interdisciplinaridade e multidisciplinaridade, optou-se por especificar a metodologia por atividade realizada.

3.1 Revisão da Literatura

A revisão bibliográfica sistemática (RBS) é um método científico baseado em buscas e análises de publicações científicas como artigos, livros e teses de uma determinada área da ciência, buscando-se conhecer o estado-da-arte sobre o tema da pesquisa, considerando uma perspectiva científica (Conforto; Amaral; Silva, 2011).

Este trabalho adotou o modelo de estratégia intitulado como RBS *Roadmap* (Conforto; Amaral; Silva, 2011) para a realização da revisão bibliográfica com uma abordagem sistemática. A estratégia utilizada foi a pesquisa empírica acerca do desempenho ambiental da tecnologia de água supercrítica e do processo de hidrometalurgia para a reciclagem de baterias de íon lítio.

Primeiramente, foram estabelecidos os termos que representam o campo de pesquisa a ser estudado a partir de uma listagem de possíveis palavras-chave. Esta listagem segue um processo de definição, teste e adaptação, onde diferentes combinações de palavras com operadores lógicos de busca foram testadas (Conforto; Amaral; Silva, 2011).

Para a definição desta listagem, duas perguntas norteadoras foram definidas: “Qual é o campo de pesquisa a ser estudado?” e “O que se deseja enxergar na pesquisa?”. Assim, o campo de pesquisa foi definido como o desempenho ambiental das tecnologias de hidrometalurgia e água supercrítica e deseja-se estabelecer qual tecnologia apresenta menor potencial de impacto ambiental em seus processos e maior taxa de eficiência técnica, apresentando maior impacto positivo no desempenho ambiental do ciclo de vida de uma bateria de íon lítio.

É importante adotar uma base de dados de referência durante o processo de teste das palavras-chave, as quais são testadas com diferentes operadores lógicos de busca objetivando o melhor resultado (Conforto; Amaral; Silva, 2011). As bases de dados utilizadas nessa etapa foram a *Scopus*, *Web of Science* e a *ScienceDirect*, das quais a *ScienceDirect* foi selecionada como referência por proporcionar os melhores e mais completos resultados durante o teste.

O processo de teste das palavras-chave foi realizado através de diversas combinações das palavras apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Listagem de palavras-chave

<i>Lithium-ion battery</i>	<i>Hydrometallurgy</i>
<i>Recycling</i>	<i>Pyrometallurgy</i>
<i>Environmental performance</i>	<i>Supercritical</i>
<i>Life cycle assessment</i>	<i>Supercritical water</i>
<i>Environmental impacts</i>	<i>SCWO</i>

Fonte: elaborado pela própria autora.

Foram realizados testes com diversas combinações das palavras-chave listadas e com os operadores lógicos de buscas “AND” e “OR”. O teste referenciado como Busca 1 foi selecionado por apresentar melhores resultados e é composto pelo arranjo “*lithium-ion battery*” AND “*hydrometallurgy*” AND “*supercritical*” AND “*Life cycle assessment OR environmental impacts*” e restrito a artigos de pesquisa e de revisão publicados nos anos de 2020 a 2026.

Com o objetivo de identificar mais publicações que relacionassem a tecnologia de água supercrítica à avaliação do ciclo de vida (ACV), foram conduzidos novos testes, obtendo o arranjo “*lithium-ion battery*” AND “*recycling*” AND “*supercritical water*” AND “*environmental impacts*”, que será referenciado como Busca 2. Foram mantidos os mesmos filtros aplicados anteriormente, ou seja, apenas artigos de pesquisa e de revisão publicados entre 2020 e 2026.

Seguindo o método RBS *Roadmap* (Conforto; Amaral; Silva, 2011), foram aplicados três filtros para refinar as buscas e selecionar os artigos de pesquisas úteis para a argumentação teórica e para a discussão dos resultados da pesquisa. O primeiro filtro consiste na leitura do título, do resumo e das palavras-chave dos artigos obtidos a partir dos arranjos. Já o segundo filtro consiste na leitura da introdução e da conclusão dos artigos selecionados após a aplicação do primeiro filtro. Por fim, o terceiro filtro consiste na leitura completa dos artigos selecionados após a aplicação do segundo filtro.

Além disso, em todos os filtros, foram considerados diferentes critérios de inclusão e qualificação definidos de acordo com o tema, a fim de priorizar os artigos e identificar os mais relevantes para o estudo (Conforto; Amaral; Silva, 2011). Os critérios utilizados em cada filtro estão apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 - Critérios de Inclusão

	Busca 1	Busca 2
Filtro 1	Baterias de íon lítio E Métodos de reciclagem E/OU Avaliação do ciclo de vida	Baterias de íon lítio E/OU Métodos de reciclagem aplicados em baterias ou em plásticos E/OU Tecnologia supercrítica E/OU Avaliação do ciclo de vida
Filtro 2	Baterias de íon lítio E Hidrometalurgia E/OU Água supercrítica E/OU Avaliação do ciclo de vida	Baterias de íon lítio E Hidrometalurgia E/OU Fluido/água supercrítica (incluindo resíduos eletrônicos ou líquidos iônicos ou filtração com separação de membranas) E/OU Avaliação do ciclo de vida
Filtro 3	Baterias de íon lítio E Hidrometalurgia E Avaliação do ciclo de vida	Baterias de íon lítio E Água supercrítica E Avaliação do ciclo de vida

Fonte: elaborado pela própria autora.

Complementarmente, realizou-se uma análise bibliométrica. Essa análise é geralmente empregada quando há um grande número de artigos sobre um tema específico e deseja-se mapear os pontos críticos da pesquisa e as tendências sobre o tema para mostrar a situação geral da área de pesquisa (Donthu *et al.*, 2021). O método tem se tornado cada vez mais atrativo pela acessibilidade das bases de dados e por sua capacidade de revelar tendências em um campo de pesquisa, baseado em bibliografia, informática, matemática e estatística, podendo ser utilizado para conduzir uma análise estatística quantitativa da literatura existente (Zhang *et al.*, 2023).

O software *Biblioshiny* baseado em comando *Bibliometrix* em R (Aria; Cuccurullo, 2017) foi utilizado para a análise do material. Esse aplicativo aceita apenas resultados de bases de dados específicas para a obtenção de dados bibliométricos, como a *Scopus*, que foi a escolhida para realizar essa análise.

O primeiro teste foi realizado com o objetivo de analisar o status da pesquisa que aborda a reciclagem hidrometalúrgica de LIBs e que realiza uma avaliação do ciclo de vida desse processo. Para manter a consistência da pesquisa, utilizou-se o mesmo arranjo obtido na Busca 1 realizada no *ScienceDirect* para a RBS com as devidas alterações de sintaxe necessárias: "*lithium-ion battery*" AND "*hydrometal**" AND "*Life cycle assessment*" AND "*environmental impacts*" (Busca 3).

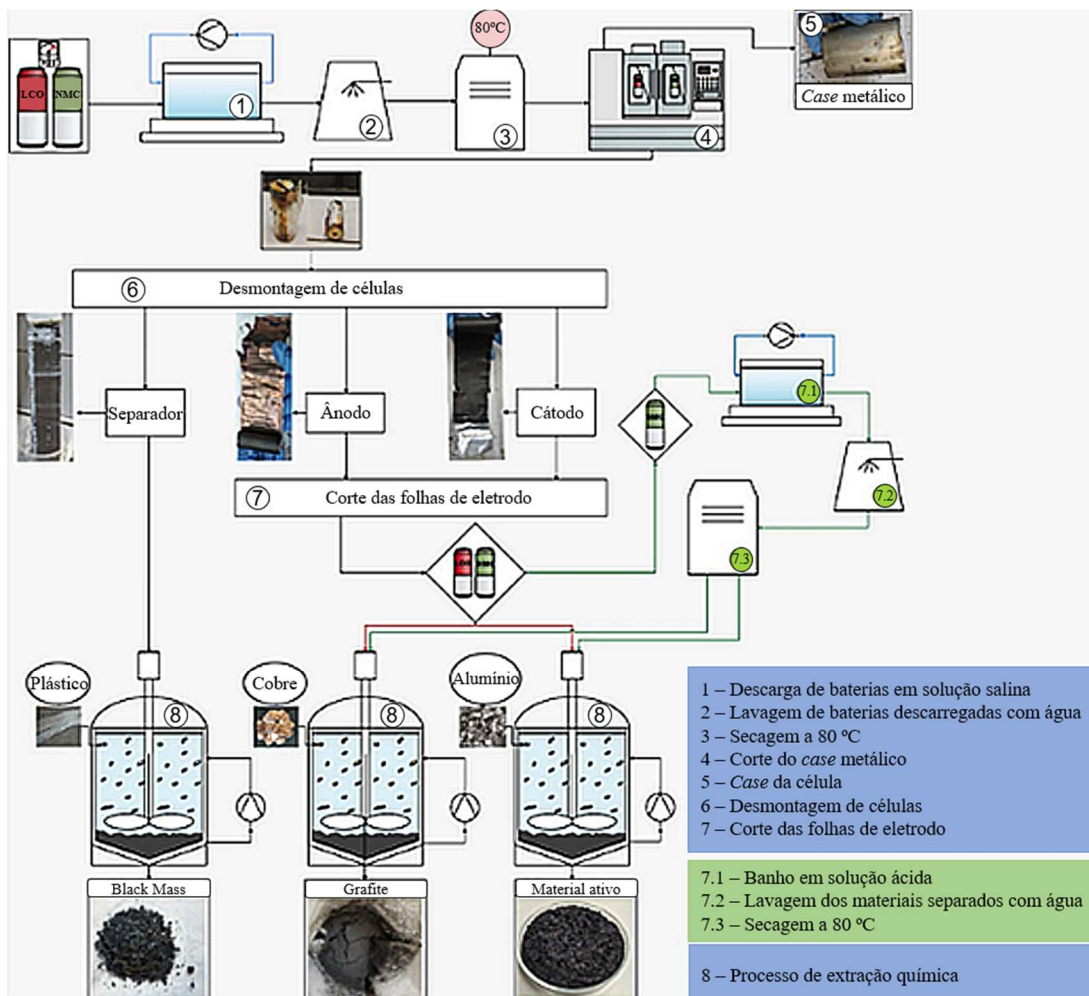
Já o segundo teste teve como objetivo analisar o tema da reciclagem de LIBs utilizando a tecnologia de água supercrítica em conjunto com a aplicação de avaliações do ciclo de vida. Assim, a Busca 2 realizada no *ScienceDirect* para a RBS com o arranjo: "*lithium-ion battery*"

AND “recycling” AND “supercritical water” AND “environmental impacts” foi implementada na base de dados *Scopus* (Busca 4).

3.2 Reprodução dos experimentos

A reprodução dos experimentos de hidrometalurgia foi realizada utilizando a rota descrita em Santos *et al.* (2021), compreendendo operações de pré-tratamento, lixiviação e recuperação de metais, a fim de validar os processos como referências para a coleta de dados do Inventário do Ciclo de Vida (ICV), etapa considerada uma das mais importantes da ACV. Os processos dessa rota hidrometalúrgica estão apresentados na Figura 2.

Figura 2 - Etapas para separação dos materiais catódicos e anódicos na hidrometalurgia



Fonte: Adaptado de Santos *et al.* (2021).

O processo inicia-se pela descarga das células, etapa indispensável para a segurança operacional das etapas subsequentes. A descarga das baterias foi realizada conforme descrito por Martins (2022), utilizando como soluto o sulfato de ferro heptahidratado, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, e

como solvente a água deionizada. Esse composto foi selecionado por se mostrar um agente eficaz e seguro para a diminuição da energia residual das células de LIBs.

Em seguida, realiza-se a abertura das baterias e a separação manual dos principais constituintes da célula, como o cátodo composto por alumínio e material ativo, o ânodo constituído por cobre e grafite em pó e os separadores formados por plástico e uma mistura de grafite e material ativo, comumente chamada de *black mass* (Santos *et al.*, 2021; Ronchini, 2022). Foram utilizadas células LCO, que possuem cátodo de LiCoO_2 (óxido de lítio cobalto) e ânodo de C_6 (grafite).

Na sequência, os separadores, o material anódico e o material catódico são submetidos a etapas distintas, visando à recuperação dos materiais presentes em cada fração. Os separadores passam por um processo de limpeza e filtração por gravidade, com o objetivo de recuperar o plástico e separá-lo da *black mass*. O material anódico é mergulhado em uma solução de hidróxido de sódio para a separação do grafite e do cobre e o material catódico, além do subprocesso com hidróxido de sódio para a separação do alumínio e do material ativo, é submetido a etapas de purificação, centrifugação e secagem do óxido. Por fim, a fração de *black mass* proveniente da reciclagem do plástico e a fração de material ativo proveniente da separação do cátodo são encaminhadas para a etapa de separação do metal, na qual um agente lixiviante é utilizado para a recuperação final dos compostos metálicos de interesse.

A escolha do ácido oxálico como agente lixiviante considerou critérios tanto práticos quanto tecno-ambientais. Sua disponibilidade no laboratório viabilizou a condução dos experimentos, enquanto, do ponto de vista tecno-ambiental, a literatura aponta sua alta seletividade para metais como cobalto e lítio, boa eficiência de lixiviação sob condições brandas e perfil ambiental mais favorável quando comparado a outros ácido orgânicos (Meshram *et al.*, 2020). Essas características tornam o ácido oxálico uma alternativa promissora para processos de reciclagem hidrometalúrgica com menor impacto ambiental.

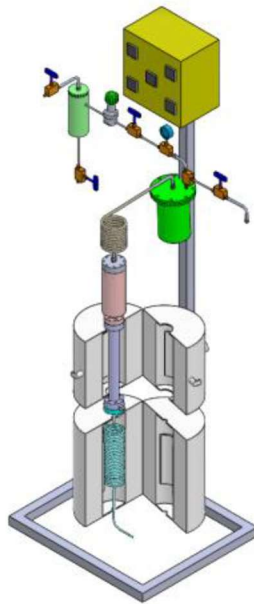
De forma análoga, os experimentos utilizando água supercrítica foram reproduzidos com a finalidade de validar se o conjunto de subprocessos desenvolvidos por Souza *et al.* (2022), Barros *et al.* (2024^a) e Barros *et al.* (2024^b) apresentaria resultados-padrão para ser elegível à coleta de ICV.

Neste caso, foi utilizado como aparato experimental um reator de fluxo contínuo, projetado para operar sob condições severas de temperatura e pressão, em que o material, nesse caso a LIB descarregada conforme descrito por Martins (2022), é inserido no início do

experimento e o reagente, no presente estudo a água, é fornecido de forma contínua. O equipamento é composto por pré-aquecedor, condensador, separador de fases e tubos construídos em aço inoxidável, conforme apresentado na Figura 3 (Aldaya *et al.*, 2023).

Para a oxidação em água supercrítica, o fluido reacional foi bombeado por meio de uma bomba de alta pressão, sendo conduzido através de tubulações até o pré-aquecedor e, posteriormente, até o reator propriamente dito. A pressão interna do sistema foi controlada por uma válvula de contrapressão, enquanto o aquecimento do pré-aquecedor e do reator foi promovido por resistências cerâmicas, monitoradas e controladas por termopares.

Figura 3 - Aparato experimental para oxidação por fluido supercrítico em LIBs



Fonte: Adaptado de Aldaya *et al.* (2023).

Após a etapa reacional, a mistura de produtos foi resfriada por meio de um condensador, com o auxílio de um banho termostatizado. Em seguida, os efluentes foram direcionados a um separador de fases, no qual ocorreu a segregação das frações gasosa, líquida e sólida. O sistema apresenta múltiplos pontos de geração e coleta de efluentes líquidos, associados à saída da fase líquida após o separador de fases, às linhas de purga do sistema, utilizadas para controle operacional e segurança, e ao alimentador do reator, em função do escoamento contínuo.

Para a validação dos experimentos de ambas as tecnologias, foram comparadas as taxas de eficiência de recuperação dos óxidos metálicos, calculadas conforme a Equação 1.

$$\text{Eficiência} = \frac{\text{Material recuperado [wt. \%]}}{\text{Material de referência [wt. \%]}} \quad (1)$$

3.3 Avaliação do Ciclo de Vida

O estudo da ACV é composto por quatro fases principais: (i) definição de objetivo e escopo, (ii) análise do inventário do ciclo de vida (ICV), (iii) avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) e (iv) interpretação dos resultados (ISO 14040, 2009).

3.3.1 Objetivo e Escopo

Na primeira fase de definição do objetivo e escopo tem-se os parâmetros de uma ACV estabelecidos, incluindo seu objetivo, que deve conter a aplicação pretendida, as razões para executar o estudo e o público-alvo, o escopo, a função do sistema, a unidade funcional, o fluxo de referência para cada sistema de produto, a fronteira e os elementos do sistema, e os requisitos de qualidade dos dados que garantem a confiabilidade dos resultados.

Deste modo, definiu-se que o objetivo principal desta ACV foi avaliar os impactos ambientais associados aos processos realizados pelas tecnologias de hidrometalurgia e fluido supercrítico aplicadas à recuperação dos materiais de LIBs. Os resultados obtidos viabilizaram analisar comparativamente os desempenhos ambientais entre a rota de água supercrítica, descrita por Souza *et al.* (2022), Barros *et al.* (2024^a) e Barros *et al.* (2024^b) e a rota hidrometalúrgica, conforme relatada por Santos *et al.* (2021).

O estudo segue uma abordagem de ACV atribucional, visando avaliar o desempenho ambiental de cada rota em condições operacionais equivalentes. Os dados primários foram coletados *in loco* durante a reprodução experimental dos processos, enquanto os dados secundários foram obtidos na literatura e em bancos de dados relevantes.

A unidade funcional foi definida com uma célula de bateria de óxido de lítio e cobalto (LCO) com massa de 43,1565 g, valor obtido a partir da massa média de 50 células. Essa definição garante que a avaliação seja baseada em uma unidade realista e representativa do processo de reciclagem, permitindo a comparação direta entre as rotas tecnológicas em condições operacionais equivalentes. Além disso, o uso de uma unidade funcional baseada em massa, vinculada a uma célula comercial real, facilita a extrapolação dos resultados para cenários de maior escala, preservando a comparabilidade dos impactos ambientais e do desempenho técnico entre os processos avaliados.

Segundo a ISO 14044 (2006), os fluxos de referência são requeridos para realizar a função expressa pela unidade funcional. Neste estudo, o fluxo de referência corresponde a uma

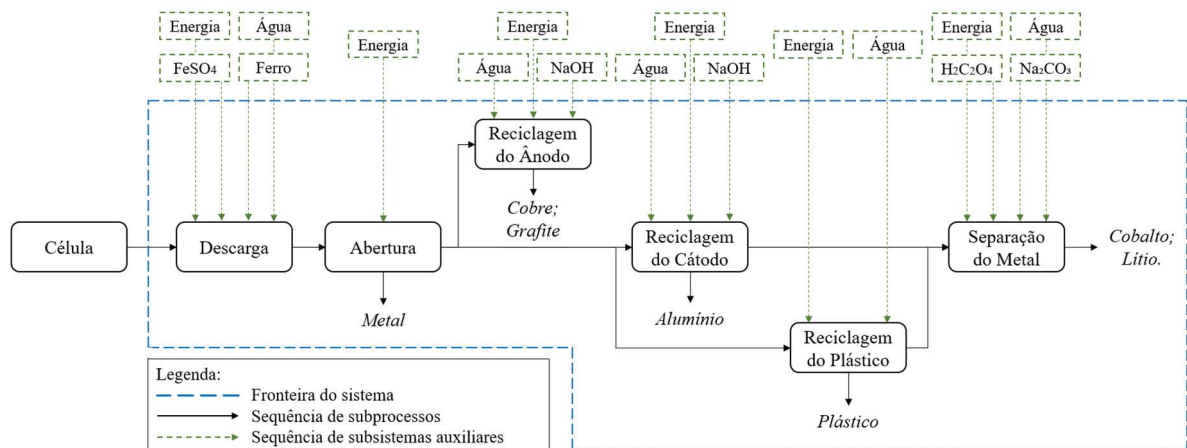
célula de bateria de LCO pesando 43,1565 g, que é a quantidade real de material que entra no sistema de reciclagem para cada tratamento e serve como base para a compilação do ICV.

O sistema de produto adotado segue a abordagem *cradle-to-gate*, ou seja, o sistema considera todas as etapas, desde a extração da matéria-prima até a separação de óxidos e/ou metais. Os limites do sistema incluem operações de pré-tratamento mecânico (por exemplo, descarga, desmontagem e separação de materiais) e a etapa de reciclagem (processamento em água supercrítica ou hidrometalúrgico), assim como as entradas de materiais e energia associadas e o tratamento de efluentes e resíduos. Processos a jusante, como a reutilização de materiais recuperados na produção de novas baterias, estão excluídos do escopo.

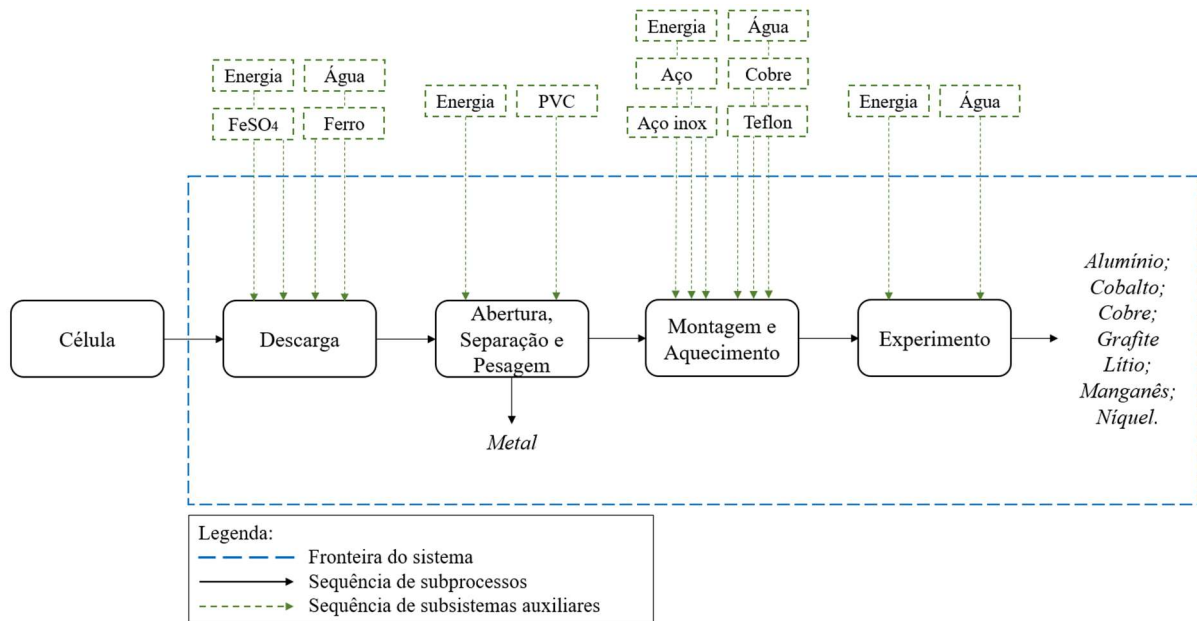
A Figura 4 apresenta um diagrama de fluxo simplificado para delimitação visual do sistema de produto da reciclagem hidrometalúrgica, enquanto a Figura 5 ilustra o sistema de produto definido para a reciclagem utilizando a tecnologia de água supercrítica.

Nenhum procedimento de alocação foi necessário, visto que as rotas de reciclagem modeladas foram consideradas como produtoras de apenas um único fluxo de material recuperado, sem subprodutos economicamente significativos que exigissem a divisão dos impactos (ISO 14040, 2009).

Figura 4 - Sistema de produto do processo hidrometalúrgico



Fonte: elaborado pela própria autora.

Figura 5 - Sistema de produto do processo utilizando água supercrítica

Fonte: elaborado pela própria autora.

3.3.2 Inventário do Ciclo de Vida

Com o escopo e os objetivos da ACV definidos, iniciou-se o inventário dos dados de entrada e saída associados a ambos os sistemas de reciclagem. Essa etapa foi conduzida predominantemente a partir da coleta de dados primários. Como os sistemas em estudo são compostos por diversos processos, o método *Unit Process Life Cycle Inventory* (UPLCI) proposto por Kellens *et al.* (2012^a) e Kellens *et al.* (2012^b) foi adotado, pois sua estrutura proporciona a flexibilidade necessária para uma modelagem precisa. Como mencionado anteriormente, ambos os processos de reciclagem foram reproduzidos em escala laboratorial, permitindo a coleta sistemática dos dados de fluxo.

Uma bateria é composta por 6 elementos principais: cátodo, ânodo, separador, case e eixo metálicos e eletrólito. Cada elemento corresponde a uma porcentagem da massa total da bateria (Ronchini, 2022). A Tabela 1 apresenta a quantificação dos materiais que constituem uma célula LCO considerando a unidade funcional.

Tabela 1 - Conversões da massa dos materiais da célula LCO.

Parte da bateria	Cátodo	Separador	Case + eixo	Ânodo	Eletrólito	Outros + plástico externo + isolantes	Total
%m	26,38%	28,58%	17,11%	20,58%	1,97%	5,37%	99,99%
Peso (kg)	0,01138	0,01233	0,00738	0,00888	0,00085	0,00232	0,04315

Fonte: elaborado pela autora a partir de Ronchini (2022).

A categoria “outros” inclui materiais perdidos durante a desmontagem, além de pequenos plásticos e fitas presentes nos cases das células como descrito por Santos *et al.* (2021) e Ronchini (2022).

Sabendo a composição do cátodo, do ânodo e dos separadores, é possível estimar a proporção dos materiais que compõem cada parte de uma célula LCO conforme indicado na Tabela 2. Esses valores foram utilizados para determinar as quantidades de produtos recuperados ao final de cada processo de reciclagem.

Tabela 2 - Proporção de materiais

Materiais	%m	Peso (kg)
Cátodo LCO	100%	0,01138
LiCoO₂	82%	0,00934
Alumínio	18%	0,00205
Ânodo LCO	100%	0,00888
Grafite	55%	0,00488
Cobre	45%	0,00400
Separadores LCO	100%	0,01233
LiCoO₂ + grafite	84%	0,01036
Plásticos	16%	0,00197

Fonte: elaborado pela autora a partir de Ronchini (2022).

Após a quantificação dos materiais, os fluxos de massa foram obtidos por cálculos estequiométricos baseados nas entradas e saídas de cada etapa. Este foi um processo iterativo no qual, à medida que os dados foram coletados, novos requisitos e limitações foram identificados, exigindo ajustes, conversões e adaptações. As entradas consideradas incluíram o consumo da energia elétrica em mega joules (MJ), a massa dos materiais em quilogramas (kg) e o consumo de água (L). As saídas incluíram os produtos recuperados (óxidos metálicos, sais metálicos e metais), os resíduos sólidos e líquidos gerados e as emissões atmosféricas.

A coleta dos fluxos de energia foi realizada pela medição de tempo de duração de execução do processo elementar, considerando-o como um processo já padronizado e, portanto, com um tempo médio com representatividade experimental. Adicionalmente, foram identificadas as potências (W) de cada equipamento utilizado. Assim, por meio da multiplicação destas duas variáveis foram obtidos os consumos energéticos de cada processo elementar. Os cálculos dos fluxos energéticos e mássicos foram normalizados de acordo com a unidade funcional e documentados no inventário do ciclo de vida.

O software *LCA for experts* da *Sphera*® foi utilizado para a modelagem da ACV, empregando os dados secundários disponibilizados pelas bases de dados, como a produção de

produtos químicos, a geração de energia e as emissões atmosféricas. Optou-se por priorizar os processos e fluxos com conjunto de dados globais (GLO), brasileiros (BR) ou da média global para regiões sem modelagem específica na base de dados (ROW, *Rest of the World*) na realização da modelagem, porém quando estes não estavam disponíveis, os processos ou fluxos referentes a Europa (RER), aos Estados Unidos (US) e a Alemanha (DE) foram escolhidos. Nos casos em que apenas um fluxo ou processo estava disponível, ele foi utilizado independentemente das restrições regionais. Quando fluxos de entrada específicos não foram localizados nas bases de dados disponíveis, estes foram substituídos pelos fluxos mais semelhantes encontrados.

Dentro desse contexto, em que a seleção de fluxos e processos do ICV foi condicionada à disponibilidade nas bases de dados acessíveis, destaca-se o caso do agente lixiviante adotado na etapa de separação dos metais da rota hidrometalúrgica. Como evidenciado anteriormente, o ácido oxálico foi selecionado com base em critérios práticos e tecno-ambientais e, no contexto do ICV, sua escolha também se justifica pela disponibilidade de seu processo produtivo modelado na base de dados *Ecoinvent* v3.8 (processo “*oxalic acid production, ROW*”), possibilitando sua modelagem no software. Esse processo, por sua vez, baseou-se no artigo de Wang *et al.* (2020), no qual se descreve a produção de ácido oxálico na China de forma detalhada. A modelagem realizada neste trabalho seguiu, principalmente, a estrutura proposta pela *Ecoinvent*, mantendo os fluxos e processos apresentados. Porém, entradas de fluxos e processos com valores negativos foram consideradas como saídas positivas, uma vez que o estudo de Wang *et al.* (2020) descreve tais fluxos como saídas. Além disso, o processo referente a construção da fábrica não foi considerado, mantendo a consistência metodológica com os processos modelados.

Para obter o impacto da geração dos resíduos sólidos e dos efluentes líquidos, foi necessária a atribuição de processos de fim de vida. O descarte em aterro foi escolhido para resíduos sólidos e o tratamento de águas residuais municipais foi escolhido para os efluentes. Essas opções foram selecionadas por representarem as principais soluções de tratamento de resíduos disponíveis no Brasil (Brasil, 2020).

Os processos de entrada e saída utilizados na modelagem do ICV no software *LCA for experts* estão apresentados no Apêndice A, enquanto os fluxos de entrada e saída estão apresentados no Apêndice B.

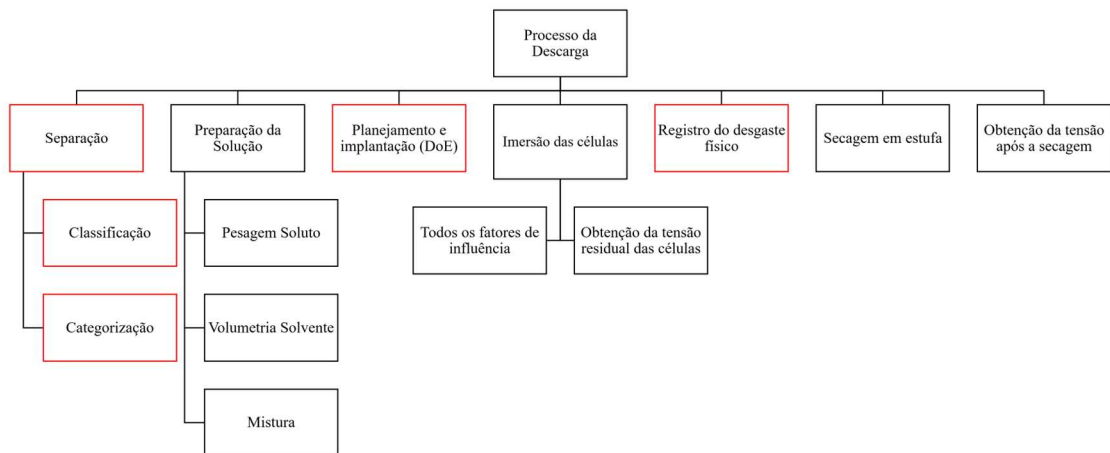
Os ICVs gerados para o processo de descarga e para os processos de reciclagem por hidrometalurgia e por água supercrítica estão apresentados nos subcapítulos a seguir. Optou-se

por essa estrutura porque o processo de descarga foi considerado o mesmo para as duas rotas de reciclagem.

3.3.2.1 Processo de Descarga

O processo de descarga otimizado está representado na Figura 6. Os subprocessos destacados em vermelho são realizados manualmente e por isso não estão associados a entradas de energia.

Figura 6 - Processo de descarga qualitativo completo.



Fonte: elaborado pela própria autora.

As informações de eletricidade foram calculadas a partir da Tabela 3, composta pelos dados dos equipamentos utilizados em todo o processo, assim como o tempo de utilização. A Tabela 4 apresenta o ICV *in loco* para o processo de descarga realizado tanto para a hidrometalurgia quanto para a tecnologia de água supercrítica.

Tabela 3 - Dados dos equipamentos - Processo de Descarga

Processo	Equipamento	Dados de identificação	Potência (W)	Tempo (H)	Energia elétrica (MJ)
Preparação da solução de descarga	Agitador Magnético	FISATOM, 752A	74,462	0,08333	0,02234
	Balança Semianalítica	Bel, L1002	1	0,01667	0,00006
Imersão da célula para a descarga	Agitador Magnético	FISATOM, 752A	74,462	4	1,07225
	Mini bomba para recirculação	Omega, RS-385	24	4	0,34560
Medição da tensão	Arduíno	-	0,2	4	0,00288
	Multímetro	Minipa, ET-1110 DMM	0,045	0,01667	2,70E-06
Secagem	Estufa de secagem	Mylabor, SSDc - 110 L	1100	8	31,68000

Fonte: elaborado pela própria autora.

Tabela 4 - Inventário do Ciclo de Vida do Processo de Descarga de LIBs

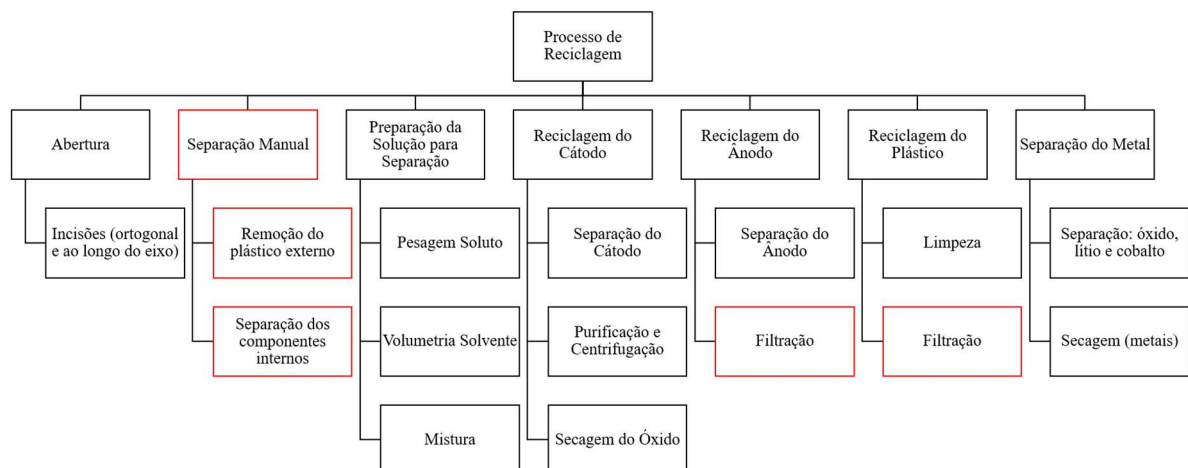
Processos	Subprocessos	Processos elementares	Entradas			Saídas		
			Fluxo	Quantidade	Unidade	Fluxo	Quantidade	Unidade
Descarga	Separação	Classificação	Processo Manual					
		Categorização	Processo Manual					
	Preparação da solução	Pesagem do Solute, Volumetria do Solvente e Mistura	Sulfato de ferro	0,00380	kg	Solução de sulfato de ferro	0,25380	kg
			Eletricidade	0,02240	MJ			
			Água deionizada	0,25000	kg			
	Planejamento e implementação (DoE)		Processo Manual					
	Imersão da célula	Agitação magnética, recirculação da solução e inserção do metal de sacrifício	Eletricidade	1,41785	MJ	Bateria LCO	0,04316	kg
			Bateria LCO	0,04316	kg			
			Solução de sulfato de ferro	0,25380	kg			
			Aço carbono	0,00750	kg			
		Medição da tensão residual das células	Eletricidade	0,00288	MJ	Bateria LCO	0,04316	kg
	Bateria LCO	0,04316	kg					
	Registro do desgaste físico		Processo Manual					
	Secagem			Eletricidade	31,68000	MJ	Bateria LCO	0,04316
		Bateria LCO	0,04316	kg				
Medição da tensão após a secagem			Eletricidade	2,70E-06	MJ	Bateria LCO	0,04316	kg
			Bateria LCO	0,04316	kg			

Fonte: elaborado pela própria autora.

3.3.2.2 Hidrometalurgia

O processo de reciclagem hidrometalúrgica reproduzido de acordo com Santos *et al.* (2021) está representado na Figura 7. Os subprocessos destacados em vermelho são realizados manualmente e por isso não apresentam entradas energéticas.

Figura 7 - Processo de reciclagem hidrometalúrgica qualitativo completo.



Fonte: elaborado pela própria autora.

As informações de eletricidade foram calculadas a partir da Tabela 5, composta pelos dados dos equipamentos utilizados em todo o processo, assim como o tempo de utilização.

Tabela 5 - Dados dos equipamentos - Reciclagem Hidrometalúrgica

Processo	Equipamento	Dados de identificação	Potência (W)	Tempo (H)	Energia elétrica (MJ)
Abertura	Dremel - Microrretífica	Dremel, 3000PR	120	0,05	0,02160
Preparação da solução de separação	Balança Semianalítica	Bel, L1002	1	0,01667	0,00006
	Agitador Magnético	FISATOM, 752A	74,462	0,08333	0,02234
Separação	Lavadora Ultrassônica	Ultronique, Q 13/40A	480	0,03333	0,05760
	Capela de exaustão	-	370	0,03333	0,04440
Purificação e Centrifugação	Agitador Magnético	FISATOM, 752A	74,462	1	0,26806
	Centrífuga de Bancada	Kasvi, K14-5000N	500	0,06667	0,12000
Secagem do Óxido	Estufa de secagem	Mylabor, SSDc 110L	1100	4	15,84000
Separação dos Metais	Manta Aquecedora	Biomixer, BX-500mL	250	3	2,70001
	Agitador Magnético	FISATOM, 752A	74,462	0,50000	0,20105
	Centrífuga de Bancada	Kasvi, K14-5000N	500	0,08333	0,15000
	Estufa de secagem	Mylabor, SSDc 110L	1100	8	31,68000

Fonte: elaborado pela própria autora.

As Tabelas 6 e 7 apresentam o ICV in loco para o processo de reciclagem utilizando a hidrometalurgia. É importante destacar que para os processos de Separação do Metal foi considerado que não houve perda de massa.

Tabela 6 - Parte 1 do ICV do Processo de Reciclagem de LIBs utilizando a Hidrometalurgia.

Processos	Subprocessos	Processos elementares	Entradas		Saídas	
			Fluxo	Quantidade Unidade	Fluxo	Quantidade Unidade
Reciclagem	Abertura	Incisões	Eletricidade	0,02160 MJ	Case e eixo	0,00738 kg
			Bateria LCO	0,04316 kg	Eletrólito	0,00085 kg
					Outros + plástico externo + isolantes	0,00232 kg
					Grafite	0,00488 kg
					Lâminas de cobre	0,00400 kg
					Lâminas de alumínio	0,00205 kg
					Óxido de lítio e cobalto (cátodo)	0,00934 kg
					Polipropileno (PP)	0,00197 kg
		Óxido de lítio e cobalto (plástico)	0,01036 kg			
Preparação da solução para separação	Pesagem do Sóluto, Volumetria do Solvente e Mistura	Hidróxido de sódio	0,00750 kg	Solução de hidróxido de sódio	0,50750 kg	
		Eletricidade	0,02240 MJ			
		Água deionizada	0,50000 kg			
Reciclagem do Cátodo	Separação do Cátodo	Eletricidade	0,10200 MJ	Solução de hidróxido de sódio	0,50750 kg	
		Solução de hidróxido de sódio	0,50750 kg	Lâminas de alumínio	0,00205 kg	
		Lâminas de alumínio	0,00205 kg	Óxido de lítio e cobalto (cátodo)	0,00934 kg	
		Óxido de lítio e cobalto (cátodo)	0,00934 kg			
	Purificação e Centrifugação	Eletricidade	0,38806 MJ	Água	0,40000 kg	
		Água deionizada	0,40000 kg	Óxido de lítio e cobalto (cátodo)	0,00934 kg	
		Óxido de lítio e cobalto (cátodo)	0,00934 kg			
	Secagem do Óxido	Eletricidade	15,84000 MJ	Óxido de lítio e cobalto (cátodo)	0,00934 kg	
Óxido de lítio e cobalto (cátodo)		0,00934 kg				

Fonte: elaborado pela própria autora.

Tabela 7 - Parte 2 do ICV do Processo de Reciclagem de LIBs utilizando a Hidrometalurgia.

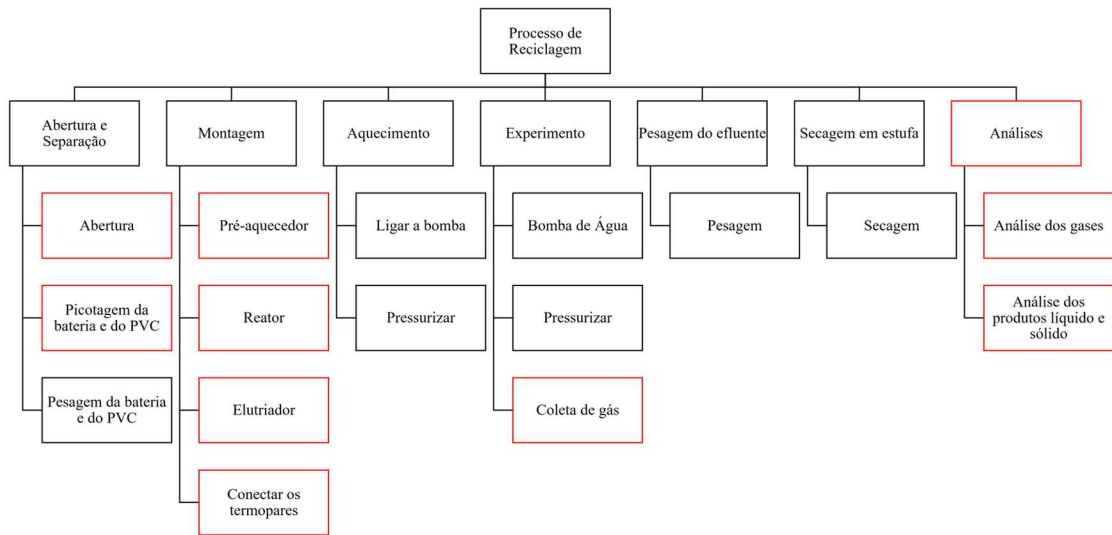
Processos	Subprocessos	Processos elementares	Entradas		Saídas			
			Fluxo	Quantidade	Unidade	Fluxo	Quantidade	Unidade
Reciclagem	Reciclagem do Ânodo	Separação do Ânodo	Eletricidade	0,10200	MJ	Solução de hidróxido de sódio	0,50750	kg
			Solução de hidróxido de sódio	0,50750	kg	Grafite	0,00488	kg
			Grafite	0,00488	kg	Lâminas de cobre	0,00400	kg
			Lâminas de cobre	0,00400	kg			
	Reciclagem do Plástico	Limpeza	Eletricidade	0,05760	MJ	Água	0,50000	kg
			Água	0,50000	kg	Polipropileno (PP)	0,00197	kg
			Polipropileno (PP)	0,00197	kg	Óxido de lítio e cobalto (plástico)	0,01036	kg
			Óxido de lítio e cobalto (plástico)	0,01036	kg			
	Separação do Metal	Separação: óxido, lítio e cobalto	Eletricidade	34,73105	MJ	Oxalato de cobalto	0,02717	kg
			Ácido oxálico	0,04914	kg	Carbonato de lítio (Li ₂ CO ₃)	0,01365	kg
			Água deionizada	1,30007	kg	Solução/ Água residual	1,34562	kg
			Óxido de lítio e cobalto I (cátodo)	0,00934	kg	Óxido não separado (LiCoO ₂)	0,00208	kg
			Óxido de lítio e cobalto II (plástico)	0,01036	kg			
Carbonato de sódio (Na ₂ CO ₃)			0,01961	kg				

Fonte: elaborado pela própria autora.

3.3.2.3 Água supercrítica

O processo de reciclagem utilizando água supercrítica reproduzido de acordo com Barros *et al.* (2022) está representado na Figura 8. Os subprocessos destacados em vermelho são realizados manualmente e por isso não incluem entradas de energia.

Figura 8 - Processo de reciclagem utilizando água supercrítica qualitativo completo.



Fonte: elaborado pela própria autora.

O processo de descarga é o mesmo da hidrometalurgia, apresentado na Figura 6.

As informações de eletricidade foram calculadas a partir da Tabela 8, composta pelos dados dos equipamentos utilizados em todo o processo, assim como o tempo de utilização em cada processo. O ICV *in loco* para o processo de reciclagem utilizando água supercrítica está apresentado nas Tabelas 9 e 10

Tabela 8 - Dados dos equipamentos - Reciclagem com água supercrítica

Processo	Equipamento	Dados de identificação	Potência (W)	Tempo (H)	Energia elétrica (MJ)
Abertura e Separação	Balança Semianalítica	Bel, L1002	1	0,03333	0,00012
	Bomba/Pressurizador	Motor WEG	370	0,38410	0,51162
Aquecimento	Banho termostático	Fisatom, 860, Brasil	2500	0,38410	3,45690
	Resistências	Corel. 220/230V	4000	0,38410	5,53104
Experimento	Bomba/Pressurizador	Motor WEG	370	2	2,66400
	Banho termostático	Fisatom, 860, Brasil	2500	2	18
	Resistências	Corel, 220/230V	4000	2	28,8
Secagem	Estufa circulante	Nova Ética, 400/4ND, Brasil	1500	24	129,6

Fonte: elaborado pela própria autora.

Tabela 9 - Parte 1 do ICV do Processo de Reciclagem de LIBs utilizando a Tecnologia de Água Supercrítica.

Processos	Subprocessos	Processos elementares	Entradas			Saídas		
			Fluxo	Quantidade	Unidade	Fluxo	Quantidade	Unidade
Abertura e Separação	Abertura		Processo Manual			Case e eixo	0,00738	kg
			Processo Manual			Eletrólito	0,00085	kg
			Eletricidade	0,00012	MJ	Outros + plástico externo + isolantes	0,00232	kg
			Bateria LCO	0,04316	kg	Bateria LCO	0,03260	kg
			PVC	0,09849	kg	PVC	0,09849	kg
Processo Experimental	Montagem	Pré-aquecedor	Bateria LCO	0,03260	kg			
			Reator	PVC	0,09849	kg		
			Elutriador	Tela de aço	0,00899	kg		
				Discos de cobre	0,05044	kg		
				Parafusos, porcas, arruela	1,82121	kg		
				Anel de teflon	0,00151	kg		
			Conectar os termopares	Processo Manual				
	Aquecimento	Ligar a bomba e pressurizar	Eletricidade	16,10162	MJ	Água deionizada	0,53565	kg
			Água deionizada	0,53565	kg			
		Banho termostatizado	Eletricidade	2,38304	MJ			
		Resistências	Eletricidade	25,76259	MJ			
	Experimento	Bomba de água e Pressurizador	Eletricidade	83,84075	MJ	Tela de aço	0,00899	kg
			Água deionizada (processo)	4,07242	kg	Discos de cobre	0,05044	kg
			Água deionizada (limpeza)	1,29422	kg	Parafusos, porcas, arruelas	1,82121	kg
		Banho termostatizado	Eletricidade	12,40843	MJ	Anel de teflon	0,00151	kg
Resistências		Eletricidade	134,14520	MJ	Produto líquido	4,13111	kg	
Coleta de gás		Processo Manual			Produto sólido	1,33959	kg	

Fonte: elaborado pela própria autora.

Tabela 10 - Parte 2 do ICV do Processo de Reciclagem de LIBs utilizando a Tecnologia de Água Supercrítica.

Processos	Subprocessos	Processos elementares	Entradas		Saídas			
			Fluxo	Quantidade	Unidade	Fluxo	Quantidade	Unidade
Processo Experimental	Pesagem do efluente		Eletricidade	0,00056	MJ	Produto líquido	4,13111	kg
			Produto líquido	4,13111	kg	Produto sólido	1,33959	kg
			Produto sólido	1,33959	kg			
	Secagem		Eletricidade	129,60000	MJ	Produto líquido	0,01849	kg
			Produto líquido	4,13111	kg	Vapor de água	4,11263	kg
			Produto sólido	1,33959	kg	Produto sólido	0,01429	kg
					Vapor de água	1,32530	kg	
Análises	Cromatografia gasosa	Processo Manual				Gás hidrogênio	5,16E-06	kg
						Metano	1,99E-05	kg
						Monóxido de carbono	1,58E-05	kg
						Dióxido de carbono	3,46E-04	kg
						Etano	1,85E-06	kg
	Análise dos produtos	Processo Manual				Óxido de cobalto (CoO)	6,54E-04	kg
						Hidróxido de lítio (LiOH)	1,38E-02	kg
						Óxido de níquel (NiO)	2,82E-02	kg
						Óxido de manganês (MnO ₂)	2,73E-03	kg
						Cloreto de cobalto (CoCl ₂)	2,30E-02	kg
						Cloreto de cobre (CuCl ₂)	5,18E-06	kg
						Carbonato de lítio (Li ₂ CO ₃)	8,69E-03	kg
						Cloreto de manganês (MnCl ₂)	8,78E-04	kg
						Cloreto de níquel (NiCl ₂)	2,62E-02	kg
			Carbono sólido	0,02665	kg			

Fonte: elaborado pela própria autora.

As conversões realizadas na Tabela 7 referentes aos materiais que constituem uma célula LCO também foram consideradas para a reciclagem utilizando água supercrítica, visto que se trata da mesma unidade funcional. Para usar a mesma unidade funcional usada na hidrometalurgia, foi considerado que o processo com água supercrítica foi realizado 4,66 vezes, visto que o processo realizado para a coleta de dados utilizou apenas 7,0366 g de bateria LCO. Os dados apresentados nas Tabelas 9 e 10 do ICV da supercrítica já consideram essa conversão.

Para determinar a massa dos produtos obtidos foram necessárias algumas considerações e cálculos. O material residual retido no reator após o experimento foi transferido para um béquer de 102,17 g, totalizando 287,60 g. Após a etapa de secagem, a massa conjunta foi reduzida para 111,91 g, resultando em 9,74 g de produto final, denominado produto sólido.

O efluente gerado durante o processo foi reunido ao efluente da purga e do alimentador, formando uma única amostra, a qual foi acondicionada em um béquer de 101,73 g, totalizando 886,92 g. Após a secagem, obteve-se 12,60 g de material, denominado produto sedimentado.

Para a caracterização, uma amostra de 0,2 g da massa final foi diluída em 100 mL, sendo analisada através da espectrometria de absorção atômica para a determinação das concentrações em mg/L. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Concentrações dos produtos finais

Produto	Concentração (mg/L)				
	Co	Cu	Li	Mn	Ni
Sedimentado	1192,55	0,28	186,74	43,86	1355,43
Sólido	3,37	0	26,18	11,29	145,24

Fonte: elaborado pela própria autora.

Embora a célula analisada seja do tipo LCO, cuja composição do material ativo do cátodo inclui predominantemente lítio e cobalto, com a presença do cobre do ânodo, os resultados obtidos na análise indicaram a presença de manganês e níquel nos produtos finais.

A detecção do manganês pode ser explicada devido a utilização prévia do mesmo aparato experimental em ensaios com baterias do tipo NMC (óxido de lítio níquel cobalto e manganês, $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$), cujo material ativo contém manganês em sua composição. Assim, há a possibilidade de contaminação cruzada associada ao histórico operacional do equipamento. No caso do níquel, sua presença está associada a efeitos corrosivos que ocorrem na parede interna do reator durante a operação (Nshizirungu *et al.*, 2020).

Para converter as concentrações obtidas (mg/L) em massas, aplicou-se o fator de diluição, permitindo determinar a quantidade de cada elemento (em mg) presente por grama de amostra. Em seguida, esse valor foi multiplicado pela massa total da amostra, do produto sólido ou do produto sedimentado, para estimar a massa total de cada componente presente nos produtos finais.

Por fim, considerando o estado físico-químico dos produtos ao final do processo e suas respectivas massas molares, ou seja, que o produto sólido é formado por óxidos e o produto sedimentado é formado por cloretos (Barros, 2024), foi possível calcular a massa total de cada composto na saída do sistema, como apresentado no ICV da Tabela 10.

Para estimar a quantidade de produto gasoso, a vazão média do gás foi determinada a partir das medições efetuadas nos 45 minutos iniciais do experimento, visto que, após esse período, a vazão se tornou muito baixa para ser quantificada com precisão (Barros *et al.*, 2024^b). Calculou-se, assim, uma vazão de 1,43 mL/min, resultando em um volume total de aproximadamente 299,73 mL (0,29973 L). A lei dos gases ideais foi aplicada utilizando a Equação 2.

$$PV = nRT \quad (2)$$

onde P é a pressão do gás (0,98690 atm), V é o volume ocupado pelo gás (0,29973 L), n é o número de mols de gás produzido, R é a constante universal dos gases ideais (0,08210 L·atm·mol⁻¹·K⁻¹) e T é a temperatura (293 K). O resultado obtido foi $n \approx 0,01230$ mol. Utilizando a massa molar da mistura gasosa, a massa correspondente de emissões atmosféricas provenientes do processo de reciclagem de LIBs utilizando água supercrítica foi calculada e apresentada na Tabela 12.

Tabela 12 - Massa dos produtos obtidos (gasoso)

Componente	Fração Molar (%mol)	Massa Molar (g/mol)	Mols por componente	Peso (kg)
H ₂	20,80%	2,016	0,00256	5,16E-06
CH ₄	10,10%	16,04	0,00124	1,99E-05
CO	4,60%	28,01	0,00057	1,58E-05
CO ₂	64,00%	44,009	0,00787	3,46E-04
C ₂ H ₆	0,50%	30,07	0,00006	1,85E-06
Total	100,00%		0,01230	3,89E-04

Fonte: elaborado pela própria autora.

3.3.3 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

É possível associar os dados de inventário do ciclo de vida obtidos a categorias específicas de impacto ambiental para melhor compreender seus potenciais efeitos por meio de uma Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV). O método de caracterização selecionado foi o ReCiPe 2016 v1.1 *Midpoint* (H), em concordância com o trabalho de Huijbregts *et al.* (2017).

A escolha do método ReCiPe 2016 deve-se à sua ampla aceitação na comunidade científica e à sua capacidade de integrar diferentes perspectivas de avaliação. Além disso, este é um método que não inclui regionalização, sendo a abordagem preferencial uma vez que não existem métodos regionalizados para o contexto brasileiro ou latino-americano. A abordagem em ponto médio (*Midpoint*) representa uma etapa intermediária na cadeia de causa e efeito dos impactos ambientais, quantificando diretamente os potenciais impactos em categorias específicas, antes de serem agregados em áreas de impacto finais. Essa abordagem permite maior transparência e menor incerteza nos resultados, sendo a mais apropriada para comparações entre processos de reciclagem. Além disso, optou-se pela perspectiva hierárquica (H) por representar uma visão científica baseada em consenso, que equilibra suposições conservadoras e de precaução, além de ser um método reconhecido na literatura acadêmica, garantindo a compatibilidade metodológica com os bancos de dados da *Sphera*® utilizados neste trabalho.

O método ReCiPe 2016 v1.1 *Midpoint* (H) abrange três conjuntos de fatores de caracterização de ponto médio e 18 categorias de impacto, conforme apresentadas na Tabela 13, juntamente com suas respectivas unidades e acrônimos.

Para a comparação dos impactos ambientais entre as duas tecnologias foram necessárias normalizações externas. A Equação 3 apresenta a primeira forma de normalização utilizada.

$$Nv = \frac{CF_{i,s}}{NF} \quad (3)$$

onde Nv é o valor normalizado para a categoria de impacto i ; $CF_{i,s}$ é o fator de caracterização medido pela unidade de uma dada substância s para a categoria de impacto i ; NF representa os fatores de normalização (pessoa/kg/unidade de uma dada substância s para a categoria de impacto i em uma perspectiva global).

Tabela 13 – Categorias de impacto ambiental do método ReCiPe 2016 v1.1 *Midpoint* (H)

Categoria de Impacto Ambiental	Acrônimo	Unidade
Climate change, incl biogenic carbon	GWP	kg CO ₂ eq.
Fine Particulate Matter Formation	PMFP	kg PM _{2.5} eq.
Fossil depletion	FDP	kg oil eq.
Freshwater Consumption	FWC	m ³
Freshwater ecotoxicity	ETPfw	kg 1,4 DB eq.
Freshwater Eutrophication	FEP	kg P eq.
Human toxicity, cancer	HTPc	kg 1,4-DB eq.
Human toxicity, non-cancer	HTPnc	kg 1,4-DB eq.
Ionizing Radiation	IRP	kBq Co-60 eq. to air
Land use	LOP	Annual crop eq.·y
Marine ecotoxicity	METP	kg 1,4-DB eq.
Marine Eutrophication	MEP	kg N eq.
Metal depletion	MDP	kg Cu eq.
Photochemical Ozone Formation, Ecosystems	HOFPeco	kg NO _x eq.
Photochemical Ozone Formation, Human Health	HOFPhh	kg NO _x eq.
Stratospheric Ozone Depletion	ODP	kg CFC-11 eq.
Terrestrial Acidification	AP	kg SO ₂ eq.
Terrestrial ecotoxicity	TETP	kg 1,4-DB eq.

Fonte: elaborado pela autora a partir de Huijbregts *et al.* (2017).

3.4. Análise Tecno-Ambiental

Para realizar a análise tecno-ambiental, utilizou-se como referência a norma ISO 14045 (2014) que estabelece os princípios e diretrizes da ecoeficiência. Essa norma foi adaptada para atender aos objetivos específicos deste trabalho. A avaliação da ecoeficiência consiste em uma ferramenta de gestão quantitativa que relaciona os impactos do ciclo de vida de um sistema de produto com o seu valor agregado, podendo esse valor ser econômico, funcional ou social, utilizando a Equação 4.

$$Ecoeficiência = \frac{P}{Impacto\ Ambiental} \quad (4)$$

onde *P* refere-se ao valor do sistema de produto e *Impacto Ambiental* corresponde ao somatório de todos os potenciais de impactos ambientais normalizados obtidos através da ACV. Nesse caso, a Equação 4 foi utilizada para calcular a Avaliação Tecno-Ambiental e a *Eficiência* (E) obtida pela Equação 1 substituirá o valor *P*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Pelo mesmo motivo justificado na Seção 3, optou-se por especificar os resultados e as discussões de cada atividade.

4.1. Revisão da Literatura

Levando em consideração os critérios de inclusão apresentados no Quadro 2 para cada filtro, foi possível reduzir as amostras dos dois testes realizados, uma vez que nem todos os estudos atenderam aos requisitos estabelecidos.

Após a aplicação do Filtro 1 na Busca 1 da Revisão Bibliográfica Sistemática, a amostra original de 99 artigos foi reduzida para 63 artigos, portanto, 36 artigos foram excluídos por não se aplicarem à proposta da pesquisa, enquanto na Busca 2, a amostra original de 98 artigos foi reduzida para 35 artigos.

A Busca 1 apresentou uma amostra de 48 artigos após a aplicação do segundo filtro e a amostra da Busca 2 foi reduzida para 16 artigos, portanto, 19 artigos foram excluídos por não se aplicarem à proposta da pesquisa.

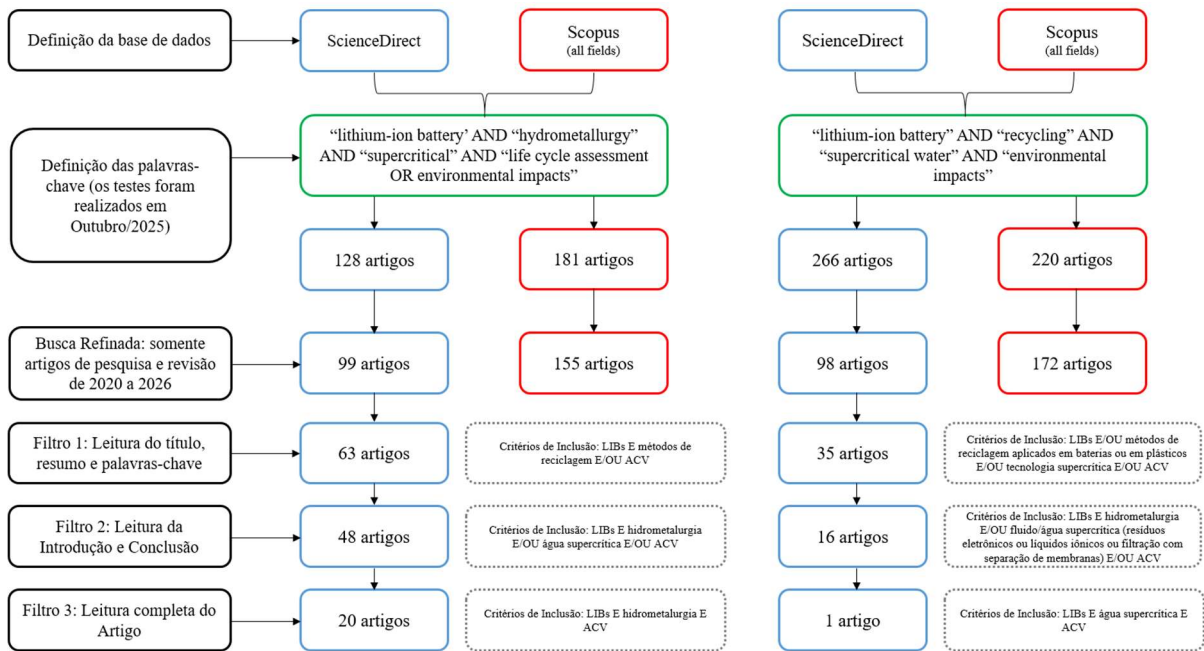
No caso da Busca 1, após a aplicação do terceiro filtro, foi obtida uma amostra de 20 artigos, já para a Busca 2, um artigo foi selecionado, portanto apenas um artigo sobre baterias de íon lítio e água supercrítica e que faz uma avaliação do ciclo de vida foi encontrado. Esse artigo também foi selecionado pela Busca 1, visto que compara o método de água supercrítica com outras técnicas de recuperação de metais de LIBs, como a hidrometalurgia.

O Quadro 3 apresenta todos os artigos selecionados pela RBS, assim como a justificativa para a seleção do artigo como relevante para o estado da arte, enquanto a Figura 9 apresenta um fluxograma explicativo do processo e dos resultados da aplicação da RBS *Roadmap*.

Quadro 3 - Artigos selecionados pela Revisão Bibliográfica Sistemática

Título do Artigo	Justificativa
Busca 1	
<i>Evaluating environmental impacts and economic performance of remanufacturing electric vehicle lithium-ion batteries</i>	O artigo aborda uma análise do ciclo de vida de quatro tipos de bateria de íon lítio (LIB) usando três métodos de reciclagem, incluindo a hidrometalurgia.
<i>Challenges for sustainable lithium supply: A critical review</i>	O artigo aborda a produção e recuperação (via hidrometalúrgica) a partir das baterias do lítio, realizando uma avaliação da pegada de carbono.
<i>Environmental hotspots and greenhouse gas reduction potential for different lithium-ion battery recovery strategies</i>	O artigo estuda a emissão de gases de efeito estufa e a demanda acumulada de energia através de uma ACV de tecnologias de recuperação de baterias de íon lítio, incluindo a hidrometalurgia.
<i>Worldwide ubiquitous utilization of lithium-ion batteries: What we have done, are doing, and could do safely once they are dead?</i>	O artigo analisa os impactos ambientais, através de uma avaliação do ciclo de vida, de três métodos de reciclagem de baterias de íon lítio, incluindo a hidrometalurgia.
<i>Evaluation of the sustainability of technologies to recycle spent lithium-ion batteries, based on embodied energy and carbon footprint</i>	O artigo apresenta parâmetros que afetam a sustentabilidade das tecnologias de reciclagem de LIBs, incluindo a hidrometalurgia, através da ferramenta ESCAPE e comparações com os resultados da ACV.
<i>Progress, challenges, and prospects of spent lithium-ion batteries recycling: A review</i>	O artigo utiliza a ACV para explorar impactos econômicos e ambientais da reciclagem de LIBs, revisando diferentes processos, como a hidrometalurgia.
<i>Assessment of the lifecycle carbon emission and energy consumption of lithium-ion power batteries recycling: A systematic review and meta-analysis</i>	O artigo utiliza estudos de ACV para analisar as emissões dos gases do efeito estufa e o perfil de consumo de energia de métodos de reciclagem de baterias de íon lítio, incluindo a hidrometalurgia.
<i>Global warming potential of lithium-ion battery cell production: Determining influential primary and secondary raw material supply routes</i>	O artigo desenvolve inventários do ciclo de vida para processos de reciclagem de baterias de íon lítio, considerando a hidrometalurgia.
<i>Advancing recycling of spent lithium-ion batteries: From green chemistry to circular economy</i>	O artigo apresenta uma análise de projeto de LIBs baseada na ACV do ciclo inteiro, incluindo dados sobre a reciclagem por hidrometalurgia.
<i>Development of sustainable and efficient recycling technology for spent Li-ion batteries: Traditional and transformation go hand in hand</i>	O artigo utiliza a avaliação do ciclo de vida para analisar a reciclagem de baterias de íon lítio usadas, incluindo a hidrometalurgia, a partir de perspectivas como aplicação, segurança e meio ambiente.
<i>Assessment of an eco-efficient process for the optimization of metal recovery in lithium cobalt oxide and lithium nickel manganese cobalt oxide batteries</i>	O artigo realiza uma análise utilizando ACV e faz uma comparação do método de água supercrítica com outras técnicas de recuperação de metais de LIBs, como a hidrometalurgia.
<i>Review of lithium-ion batteries' supply-chain in Europe: Material flow analysis and environmental assessment</i>	O artigo apresenta uma ACV da cadeia de abastecimento de LIBs, utilizando o método ReCiPe 2016, comparando a hidrometalurgia com a pirometalurgia.
<i>Comparative environmental and economic assessment of emerging hydrometallurgical recycling technologies for Li-ion battery cathodes</i>	O artigo realizou uma ACV baseada em uma LIB do tipo NMC, analisando várias etapas do tratamento hidrometalúrgico, incluindo lixiviação à base de fluido supercrítico, nesse caso CO ₂
<i>A review of contemporary and emerging recycling methods for lithium-ion batteries with a focus on NMC cathodes</i>	O artigo cita estudos que realizam ACV e abordagens para comparar processos com base em impactos ambientais como a avaliação do impacto ambiental de LIBs do tipo NMC utilizando processos hidrometalúrgicos.
<i>A comprehensive review of electric vehicle recycling: Processes in selective collection, element extraction, and component regeneration</i>	O artigo apresenta discussões sobre eficiência energética e redução de emissões, referenciando estudos de ACV sobre reciclagem de LIBs de VEs
<i>Upcycling and recycling of spent battery waste for a sustainable future: Progress and perspectives</i>	O artigo revisa métodos convencionais de reciclagem de LIBs, como a hidro, e discute sustentabilidade e eficiência ambiental com base na literatura.
<i>A comprehensive review of whole process typical hydrometallurgical technologies for recycling waste lithium-ion batteries</i>	O artigo foca na reciclagem de LIBs, comparando hidrometalurgia com pirometalurgia e reciclagem direta e referência modelos de ACV existentes, fornecendo viabilidade ambiental comparativa
<i>Recycling strategies for renewable graphite and other carbon nanomaterials from used batteries: A review</i>	O artigo aborda a reciclagem de grafite de LIBs e a integração da hidrometalurgia aplicada à recuperação de grafite e nanocarbonos, apresentando uma análise dos impactos ambientais a partir de uma ACV.
<i>Advancements of lithium-ion battery Recycling: Transitioning from traditional methods to AI and machine learning techniques</i>	O artigo aborda a reciclagem de LIBs, destacando benefícios ambientais da hidrometalurgia com base em estudos de ACV que utilizam 1 kWh como unidade funcional.
<i>Recycling of spent lithium iron phosphate batteries—a review of processes, economics, and carbon footprint</i>	O artigo compara métodos de reciclagem de baterias LFP, incluindo a hidrometalurgia, e apresenta uma ACV considerando como unidade funcional 1 kg de <i>black-mass</i> , dados primários e secundários (Ecoinvent e GaBi).
Busca 2	
<i>Assessment of an eco-efficient process for the optimization of metal recovery in lithium cobalt oxide and lithium nickel manganese cobalt oxide batteries</i>	O artigo realiza uma análise utilizando ACV, fazendo uma comparação do método de reciclagem de LIBs por água supercrítica com outras técnicas de recuperação de metais.

Fonte: elaborado pela própria autora.

Figura 9 - Processo e resultados da RBS Roadmap

Fonte: elaborado pela própria autora.

A partir dessa revisão da literatura, identificou-se um número crescente de estudos que empregam ferramentas quantitativas, como avaliação do ciclo de vida (ACV), análise da pegada de carbono, avaliação do consumo energético e análise econômica, para comparar rotas de reciclagem de LIBs, com destaque para a hidrometalurgia.

Yu *et al.* (2021) compararam a reciclagem física direta, a hidrometalurgia e a pirometalurgia quanto às emissões de gases do efeito estufa (GEE), consumo de água e custo de fabricação. De forma semelhante, Wu *et al.* (2022) avaliaram as etapas da hidrometalurgia e da pirometalurgia (pré-tratamento, separação e reciclagem de metais), considerando as emissões de GEE como indicador principal. Fahimi *et al.* (2022) analisaram 33 tecnologias de reciclagem com diferentes abordagens (hidrometalúrgica, pirometalúrgica e reciclagem direta), considerando a energia incorporada e pegada de carbono. Premathilake *et al.* (2024) realizaram uma análise de 18 categorias de impacto ambiental, comparando quatro métodos de lixiviação, três processos de purificação/separação e dois de calcinação dentro da rota hidrometalúrgica. Li *et al.* (2023) contrastaram rotas de hidrometalurgia, pirometalurgia, direta e híbridas (hidropirometalúrgica) com base no potencial de aquecimento global (GWP) e na demanda acumulada de energia (CED). Já Bruno e Fiore (2024) compararam os impactos ambientais da hidrometalurgia e da pirometalurgia, calculando indicadores como GWP, acidificação, eutrofização e toxicidade humana.

Além dessas análises comparativas, revisões recentes vêm consolidando o estado da arte das tecnologias de reciclagem, destacando desafios técnicos, ambientais e econômicos, sobretudo nas rotas de hidrometalurgia, pirometalurgia e reciclagem direta para as LIBs, e discutem avanços, lacunas e oportunidades para a sustentabilidade (Li *et al.*, 2024; Shekhar; Parekh; Pol, 2022; Sofian *et al.*, 2025; Song *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2024; Deng *et al.*, 2025; Xiao *et al.*, 2025; Azimi; Chan, 2024).

Por fim, estudos aplicados, como os de Abdelbaky *et al.* (2023), Abhilash *et al.* (2025), Korde *et al.* (2026) e Azimi e Zadeh (2026) utilizaram estudos de ACV como ferramenta central para analisar impactos ambientais relacionados às diferentes tecnologias de reciclagem de LIBs, incluindo a hidrometalurgia.

Para a análise bibliométrica da tecnologia de reciclagem hidrometalúrgica para LIBs com o estudo da ACV (Busca 3), buscando os termos apenas no título, resumo e palavras-chave, 76 artigos foram encontrados e selecionando apenas os artigos e revisões publicados nos anos de 2020 a 2026, 66 artigos foram encontrados. Para realizar uma revisão bibliométrica mais abrangente, foram considerados todos os campos, sem filtros, obtendo assim 1347 artigos.

Aplicando o filtro do *Biblioshiny*, selecionando os artigos e revisões publicados nos anos de 2020 a 2025, foi obtida uma amostra de 1138 artigos.

Os principais resultados obtidos são apresentados nas Figuras 10 a 13.

Figura 10 - Nuvem de Palavras da Busca 3

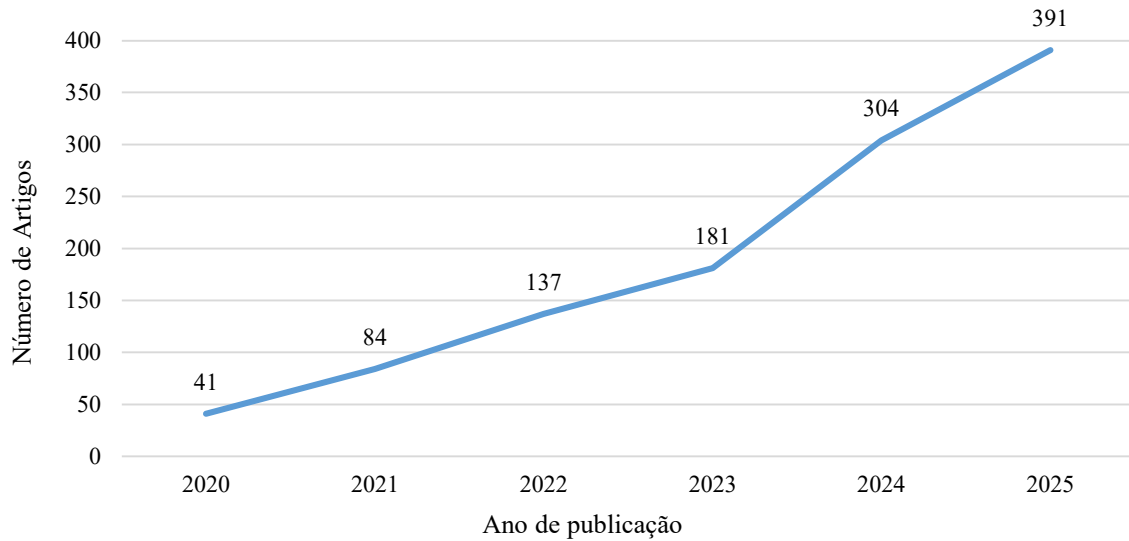


Fonte: elaborado pela autora a partir do pacote *Bibliometrix* (Aria; Cuccurullo, 2017) via *Biblioshiny*.

A Figura 10 apresenta uma nuvem de palavras que fornece uma representação visual das palavras mais frequentes que aparecem nos artigos de acordo com suas palavras-chave. Em números, tem-se “*recycling*” em primeiro lugar com 199 menções, ou seja, esse termo aparece

199 vezes entre as palavras-chave dos artigos analisados. O termo “*life cycle assessment*” aparece em segundo com 159 menções e o termo “*lithium-ion batteries*” aparece em quarto lugar com 99 menções, enquanto “*hydrometallurgy*” aparece em sexto lugar com 65 menções.

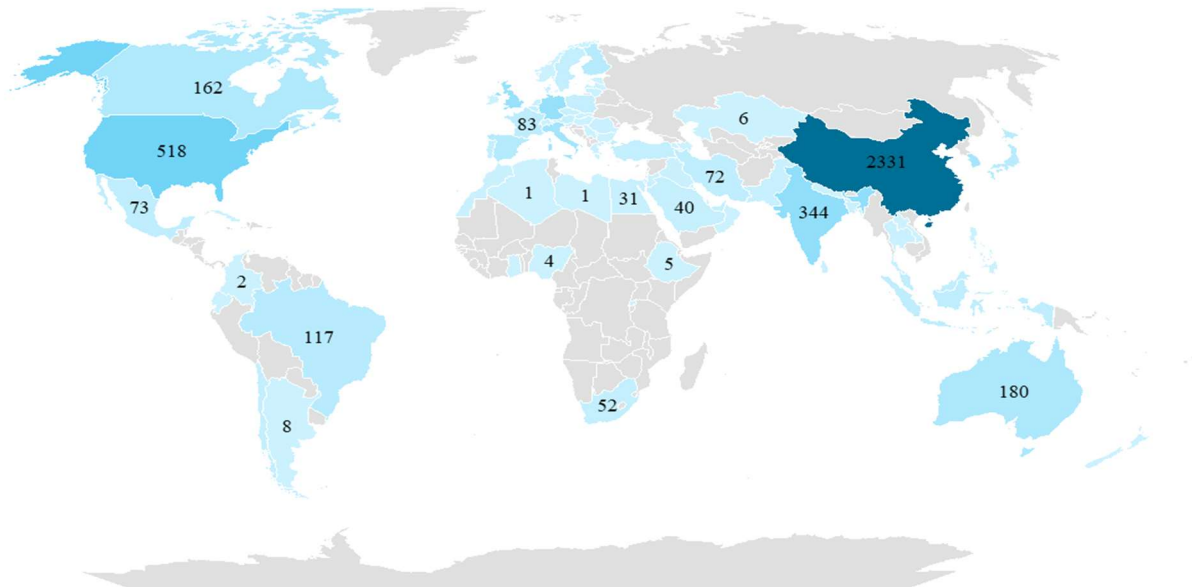
Figura 11 - Produções Científicas Anuais da Busca 3



Fonte: elaborado pela autora a partir do pacote *Bibliometrix* (Aria; Cuccurullo, 2017) via *Biblioshiny*.

A Figura 11 apresenta o número de produções científicas por ano, evidenciando o quanto esse tema tem se tornado mais relevante, considerando um aumento de 350 publicações no tema em 5 anos (de 2020 a 2025).

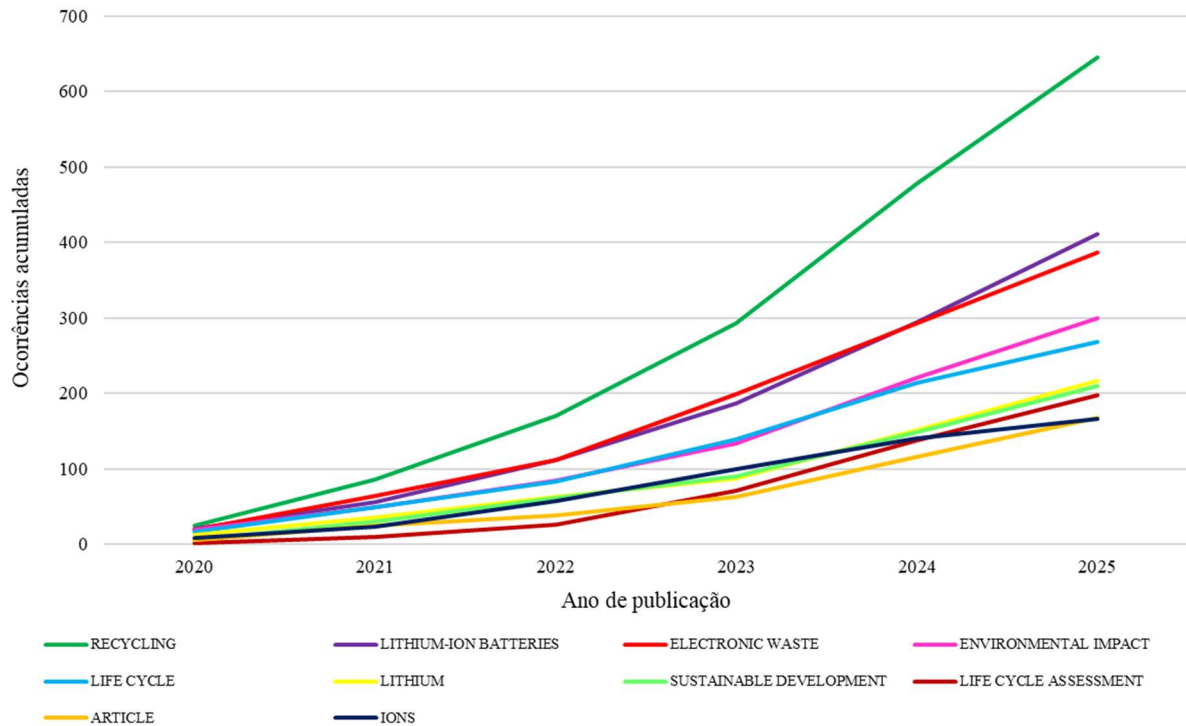
Figura 12 - Produção Científica por País da Busca 3



Fonte: elaborado pela autora a partir do pacote *Bibliometrix* (Aria; Cuccurullo, 2017) via *Biblioshiny*.

A Figura 12 apresenta a produção científica por país dentro do conjunto de artigos analisados, apresentando quantos artigos têm autores afiliados a instituições de determinado país. A China destaca-se com 2331 ocorrências em um total de 1347 artigos analisados, indicando a elevada participação de pesquisadores chineses. O Brasil aparece em 12º lugar com 117 ocorrências, refletindo seu peso na produção científica nessa área.

Figura 13 - Frequência das Palavras ao longo do Tempo da Busca 3



Fonte: elaborado pela autora a partir do pacote *Bibliometrix* (Aria; Cuccurullo, 2017) via *Biblioshiny*.

Por fim, a Figura 13 mostra a frequência dos termos utilizados com o passar dos anos, indicando tendências importantes para a área de estudo. A palavra “*recycling*” teve 24 menções em palavras-chave em 2020, número que cresceu para 645 já em 2025. Outro exemplo é “*lithium-ion batteries*” que em 2020 tinha 20 menções e aumentou para 411 em 2025.

Considerando a análise bibliométrica da tecnologia de água supercrítica para a reciclagem de LIBs com uma ACV (Busca 4), nenhum artigo foi encontrado ao buscar os termos apenas no título, resumo e palavras-chave. Portanto, foram considerados todos os campos, sem filtros, obtendo assim 220 artigos. Aplicando o filtro do software *Biblioshiny*, selecionando os artigos e revisões publicados de 2020 a 2026, foi obtida uma amostra de 169 artigos. Os principais resultados obtidos são apresentados nas Figuras 14 a 17.

Por fim, a Figura 17 mostra a frequência dos termos utilizados com o passar dos anos. A palavra “*recycling*” teve 7 menções em palavras-chave em 2020, crescendo para 61 já em 2025. Outro exemplo é o termo “*metal recovery*”, que em 2020 tinha 4 menções e em 2025 aumentou para 29 menções.

4.2. Reprodução dos experimentos

Para a validação dos experimentos, a Equação 1 foi aplicada para calcular e comparar as taxas de eficiência de recuperação dos óxidos metálicos obtidos na reprodução dos experimentos com os descritos por Santos *et al.* (2021). Os resultados de eficiência de recuperação dos metais pela tecnologia de água supercrítica também foram calculados e comparados com os descritos por Barros *et al.* (2024^b). As taxas de eficiência de recuperação obtidas estão apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 - Taxas de eficiência de recuperação dos produtos das LIBs

Óxido metálico	Metal	Eficiência de recuperação [%]	
		Hidrometalurgia	Água Supercrítica
LCO	Li	~ 92	~ 100
	Co	~ 99	~ 100

Fonte: elaborado pela autora a partir de Santos *et al.* (2021) e Barros *et al.* (2024^b).

Seguindo os parâmetros e procedimentos das referências, os resultados de eficiência de recuperação obtidos pela reprodução dos experimentos permitiram considerar o conjunto de subprocessos como “processos-padrão” para a realização da ACV, visto que os valores obtidos foram aproximadamente os mesmos.

4.3. Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

Após a validação dos processos experimentais, procede-se à avaliação dos impactos. Utilizando o método de caracterização ReCiPe 2016 v1.1 *Midpoint* (H) foi possível obter os valores de impactos ambientais das tecnologias de hidrometalurgia e água supercrítica para a reciclagem de uma célula de LIB, conforme apresentado na Tabela 15.

Para melhor compreensão realizou-se a normalização interna adotando duas estratégias: a primeira apresenta as contribuições de cada processo (macroprocesso) de ambas as tecnologias para cada categoria de impacto ambiental. Já a segunda normalização analisa as contribuições de cada processo elementar (operação unitária) para os impactos ambientais de cada processo de ambas as tecnologias. A Figura 18 apresenta a normalização para os

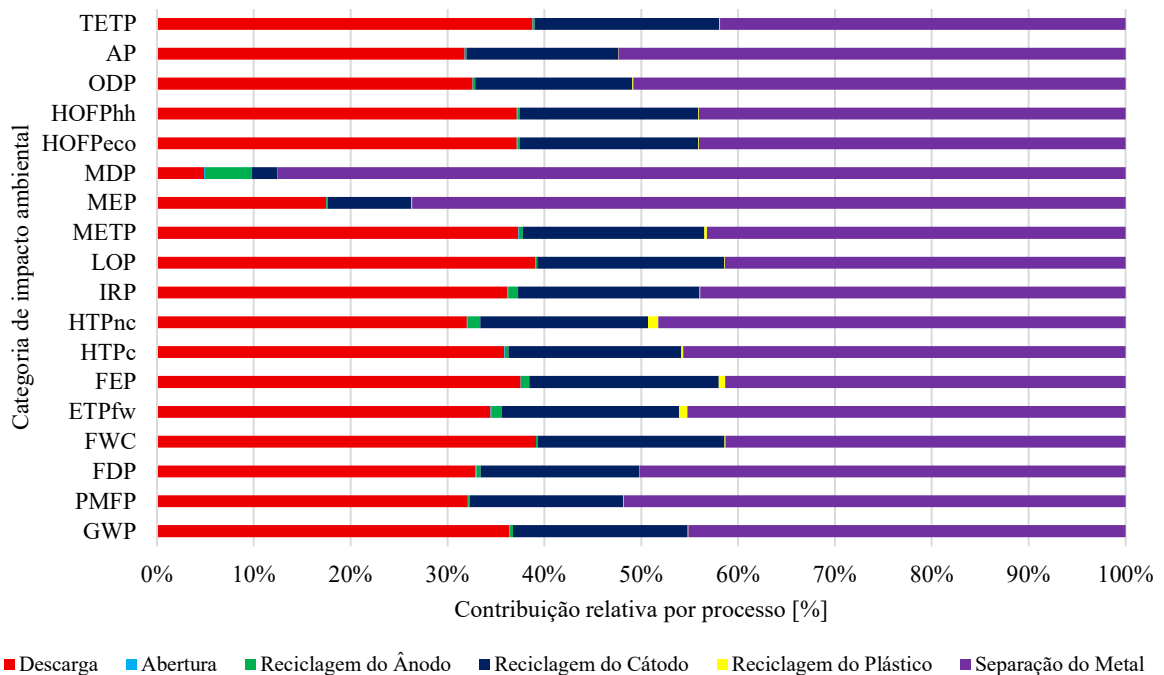
macroprocessos da hidrometalurgia. Cabe destacar que os gráficos apresentados nas Figuras 19 a 28 ilustram os valores absolutos dos impactos ambientais obtidos.

Tabela 15 - Valores de impactos ambientais das tecnologias analisadas em cada categoria do método ReCiPe 2016 *Midpoint* (H)

Categoria de Impacto Ambiental	Hidrometalurgia	SCW	SCW/Hidrometalurgia [%]	Unidade
GWP	4,53E+00	2,36E+01	421,28%	kg CO ₂ eq.
PMFP	5,04E-03	2,14E-02	323,75%	kg PM2.5 eq.
FDP	9,15E-01	3,95E+00	331,35%	kg oil eq.
FWC	3,89E-01	2,02E+00	418,06%	m ³
ETPfw	6,86E-04	3,11E-03	353,27%	kg 1,4 DB eq.
FEP	5,28E-05	2,91E-04	451,56%	kg P eq.
HTPc	2,32E-02	1,11E-01	377,51%	kg 1,4-DB eq.
HTPnc	1,17E-01	4,87E-01	316,21%	kg 1,4-DB eq.
IRP	3,15E-02	1,47E-01	366,84%	kBq Co-60 eq. to air
LOP	7,23E-01	3,72E+00	415,03%	Annual crop eq.·y
METP	3,56E-03	1,75E-02	391,34%	kg 1,4-DB eq.
MEP	2,02E-03	4,75E-03	134,87%	kg N eq.
MDP	-7,57E-02	-1,22E-01	61,49%	kg Cu eq.
HOFPeco	7,36E-03	3,64E-02	394,16%	kg NO _x eq.
HOFPhh	7,27E-03	3,59E-02	394,19%	kg NO _x eq.
ODP	2,87E-06	1,24E-05	331,18%	kg CFC-11 eq.
AP	1,65E-02	6,91E-02	319,17%	kg SO ₂ eq.
TETP	3,59E+00	1,83E+01	410,38%	kg 1,4-DB eq.

Fonte: elaborado pela própria autora.

Figura 18 - Contribuições relativas de cada processo da hidrometalurgia por categoria de impacto ambiental



Fonte: elaborado pela própria autora.

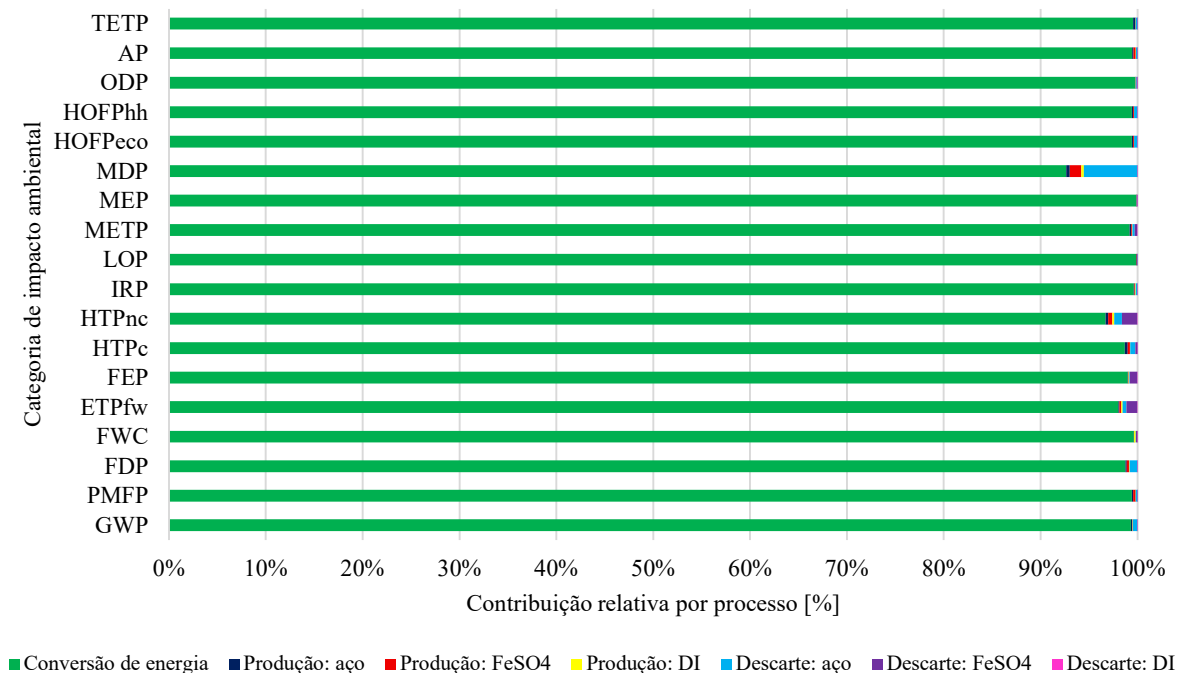
Analisando os macroprocessos, é possível notar que, para a rota hidrometalúrgica, a descarga e a separação do metal são os processos que mais contribuíram em todas as categorias de impacto ambiental.

As Figuras 19 a 24 mostram as contribuições relativas de cada processo elementar da hidrometalurgia para cada categoria de impacto ambiental.

Considerando as contribuições relativas da etapa de descarga apresentadas na Figura 20, tem-se como processos elementares:

- Conversão da Energia - produção de energia elétrica no Brasil em 2025 que combina diferentes fontes de geração de eletricidade na faixa de 1kV a 60 kV (processo utilizado em todas as etapas da hidrometalurgia e da supercrítica);
- Produção: aço - produção do metal de sacrifício (aço carbono);
- Produção: FeSO₄ - produção do sulfato de ferro;
- Produção: DI - produção da água deionizada (*Deionized Water*);
- Descarte: aço - descarte em aterro sanitário do aço;
- Descarte: FeSO₄ - tratamento do sulfato de ferro proveniente do esgoto municipal;
- Descarte: DI - tratamento da água deionizada proveniente do esgoto municipal.

Figura 19 - Contribuições relativas do processo de descarga para cada categoria de impacto ambiental



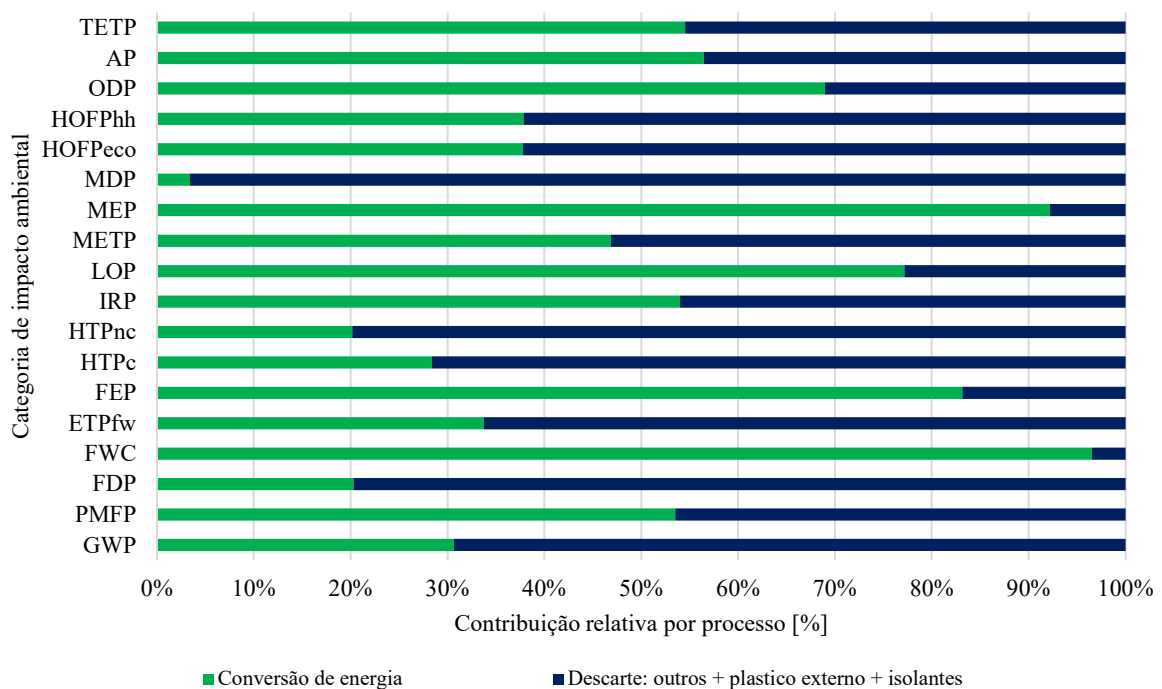
Fonte: elaborado pela própria autora.

Para o processo de descarga é possível notar que o processo de conversão de energia é o que mais contribui para todas as categorias de impacto, o que pode estar relacionado à secagem da célula após a descarga eletroquímica que é um processo longo, de 8 horas, com alto consumo de energia.

Considerando o processo de abertura da bateria apresentado na Figura 20 tem-se os processos elementares:

- Conversão da Energia - produção de energia elétrica no Brasil em 2025;
- Descarte: outros + plástico externo + isolantes - descarte em aterro sanitário dos materiais das células que caíram durante a desmontagem, pequenos plásticos e fitas presentes nos cases, além do plástico externo e dos isolantes das células.

Figura 20 - Contribuições relativas do processo de abertura da hidrometalurgia para cada categoria de impacto ambiental



Fonte: elaborado pela própria autora.

O processo de abertura apresenta diferentes contribuições para cada categoria de impacto ambiental. Por exemplo, para a categoria GWP (*Global Warming Potential*) que diz respeito as mudanças climáticas incluindo o carbono biogênico, tem-se uma contribuição de 69,36 % relacionada ao processo descarte em aterro. Esse impacto poderia facilmente ser reduzido definindo um fim de vida sustentável para esses materiais.

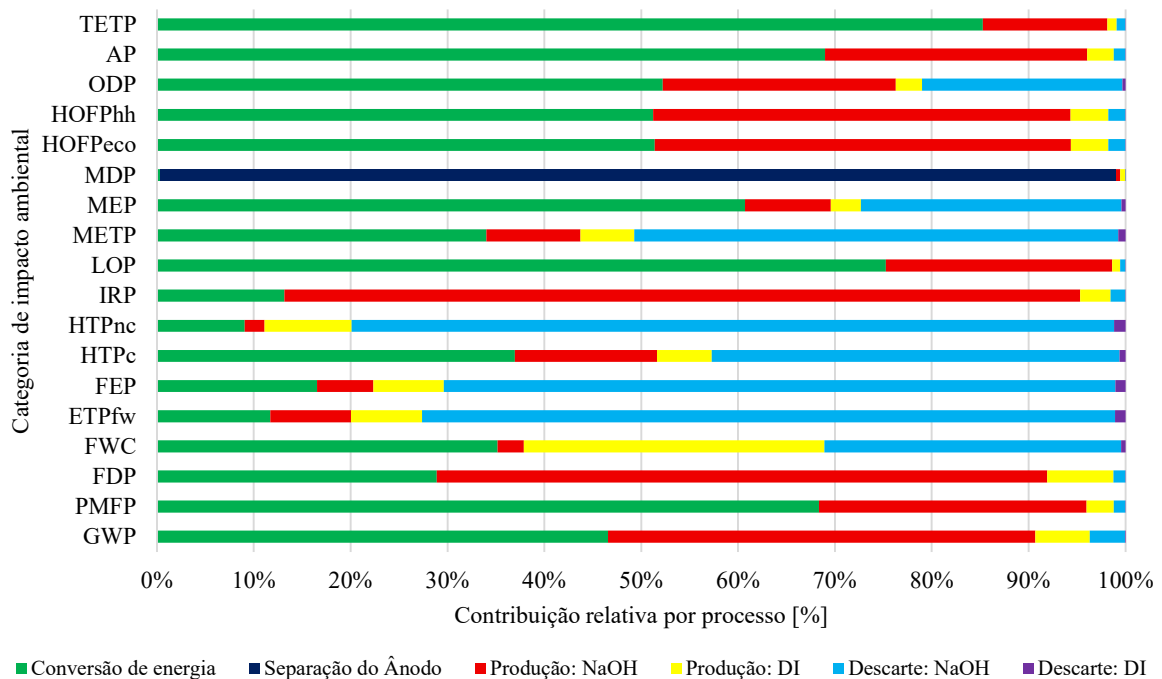
Por outro lado, a categoria FWC (*Freshwater Consumption*) tem uma contribuição de 96,55 % relacionada à conversão de energia, pois a produção energética no Brasil apresenta elevada participação de fontes renováveis.

Esses valores podem ser conferidos no Apêndice D.

A Figura 21 apresenta as contribuições relativas dos processos elementares da reciclagem do ânodo, sendo eles:

- Conversão da Energia - produção de energia elétrica no Brasil em 2025;
- Separação do Ânodo;
- Produção: NaOH - produção do hidróxido de sódio;
- Produção: DI - produção da água deionizada;
- Descarte: NaOH - tratamento do hidróxido de sódio proveniente do esgoto municipal;
- Descarte: DI - tratamento da água deionizada proveniente do esgoto municipal.

Figura 21 - Contribuições relativas do processo de reciclagem do ânodo da hidrometalurgia para cada categoria de impacto ambiental



Fonte: elaborado pela própria autora.

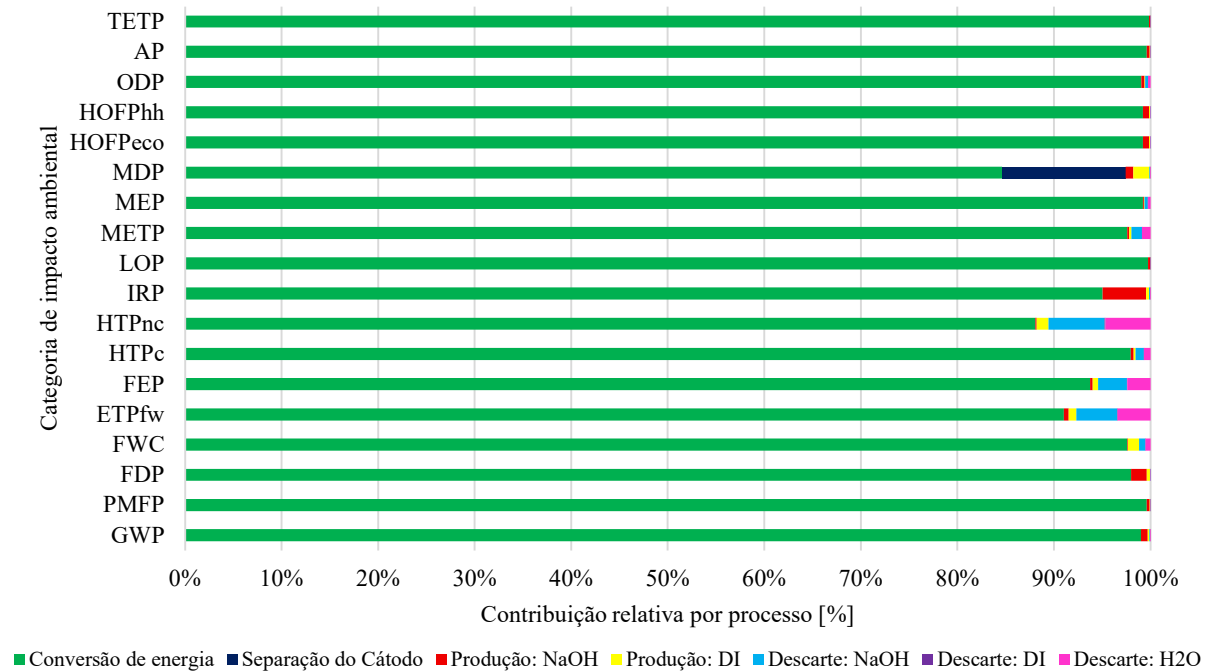
Para o processo de reciclagem do ânodo têm-se diferentes contribuições, podendo destacar a categoria de impacto MDP (*Metal Depletion*) que apresentou contribuição predominante do processo Separação do Ânodo com 98,68 % em módulo. Esse valor pode ser

explicado porque, durante o processo de reciclagem do ânodo, tem-se a recuperação de grafite e cobre como produtos na saída.

A Figura 22 apresenta os processos elementares na etapa de reciclagem do cátodo, que são:

- Conversão da Energia - produção de energia elétrica no Brasil em 2025;
- Separação do Cátodo;
- Produção: NaOH - produção do hidróxido de sódio;
- Produção: DI - produção da água deionizada (*Deionized Water*);
- Descarte NaOH, DI, H₂O - tratamento de resíduos provenientes do esgoto municipal;

Figura 22 - Contribuições relativas do processo de reciclagem do cátodo da hidrometalurgia para cada categoria de impacto ambiental



Fonte: elaborado pela própria autora.

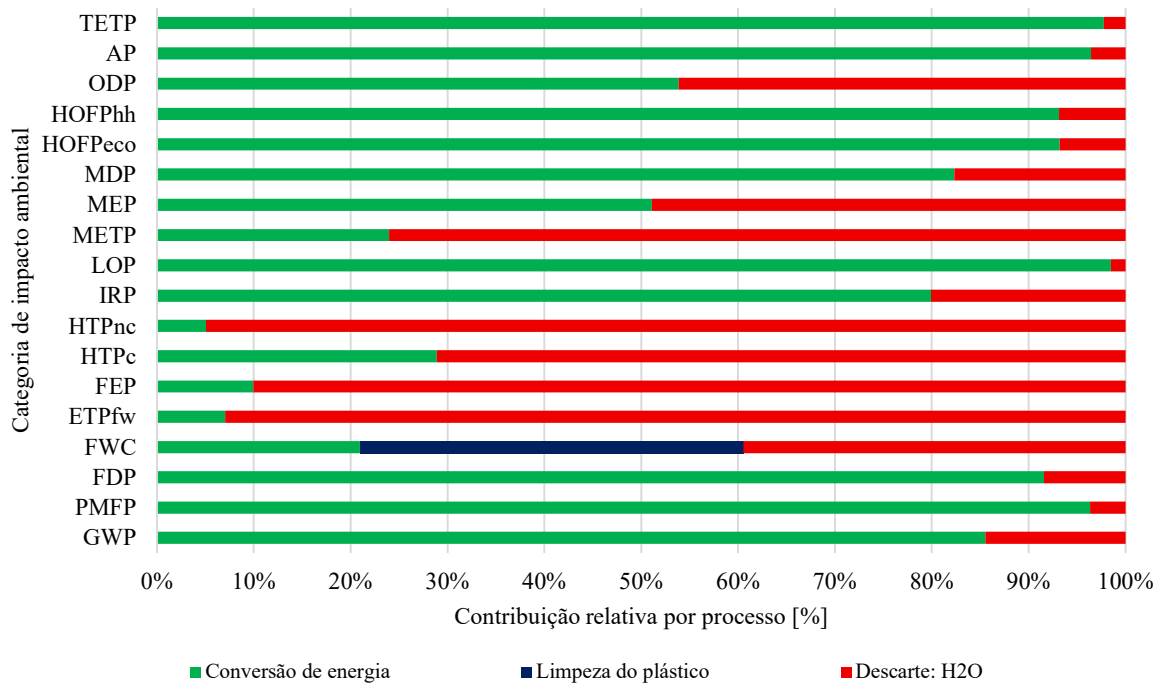
Durante o processo da reciclagem do cátodo, nota-se que a maior contribuição está relacionada à conversão da energia em todas as categorias de impacto, comportamento semelhante ao observado no processo de descarga. Isso se deve principalmente à etapa de secagem do óxido, que possui duração de 4 horas, apresentando elevado consumo energético.

Sem considerar os valores em módulo, a categoria de impacto MDP apresentou uma contribuição positiva de 113,75 % na etapa de conversão de energia, enquanto a etapa de separação do cátodo resultou em -17,21 %, relacionado à recuperação do alumínio.

Na Figura 23 são apresentadas as contribuições dos processos elementares da reciclagem do plástico que são:

- Conversão da Energia - produção de energia elétrica no Brasil em 2025;
- Limpeza do plástico;
- Descarte: H₂O - tratamento da água proveniente do esgoto municipal.

Figura 23 - Contribuições relativas do processo de reciclagem do plástico da hidrometalurgia para cada categoria de impacto ambiental



Fonte: elaborado pela própria autora.

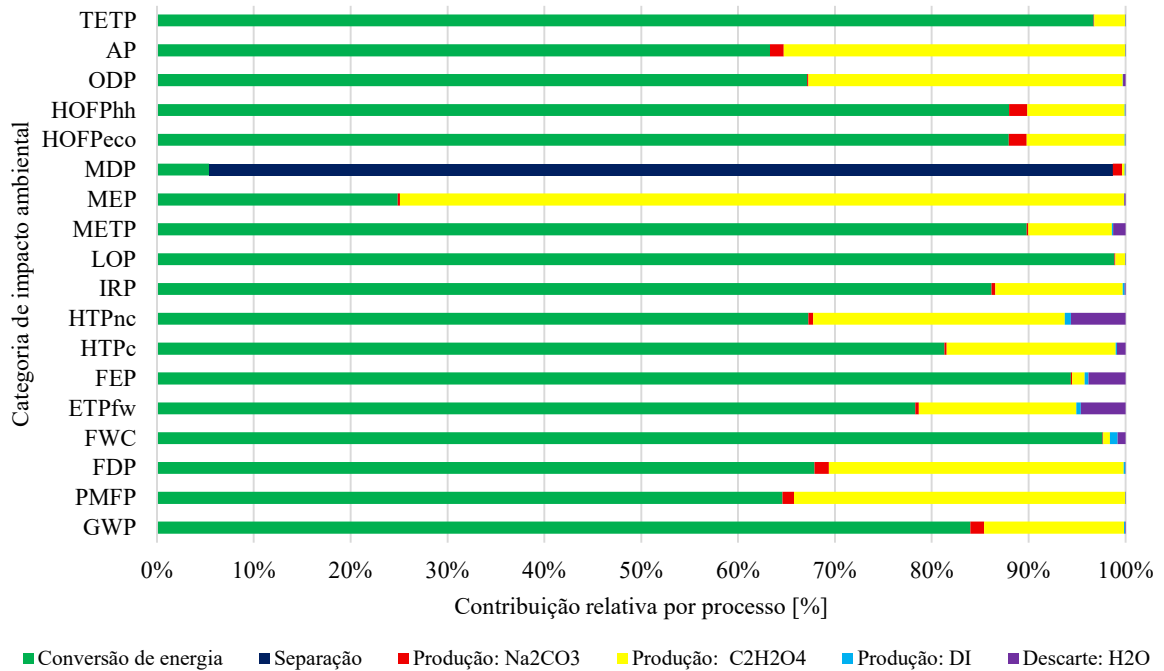
As principais contribuições para o processo de reciclagem do plástico da rota hidrometalúrgica são a conversão da energia e o Descarte: H₂O, que indica o tratamento da água após seu uso como fim de vida. Sem considerar os valores em módulo, a categoria de impacto FWC (*Freshwater Consumption*) apresentou uma contribuição negativa de -186,65 %, atribuída ao tratamento da água ao final de seu uso. O valor negativo pode ser explicado justamente pelo fim de vida da água que considera o seu tratamento antes do reuso, o que reduz a necessidade de captação de água doce nova.

Por fim, a Figura 24 apresenta o processo de separação do metal, última etapa do processo de reciclagem hidrometalúrgica, que tem como processos elementares:

- Conversão da Energia - produção de energia elétrica no Brasil em 2025;
- Separação;
- Produção: Na₂CO₃ - produção de carbonato de sódio;

- Produção: $C_2H_2O_4$ - produção de ácido oxálico;
- Produção DI - produção da água deionizada;
- Descarte: H_2O - tratamento da água proveniente do esgoto municipal.

Figura 24 - Contribuições relativas do processo de separação do metal da hidrometalurgia para cada categoria de impacto ambiental



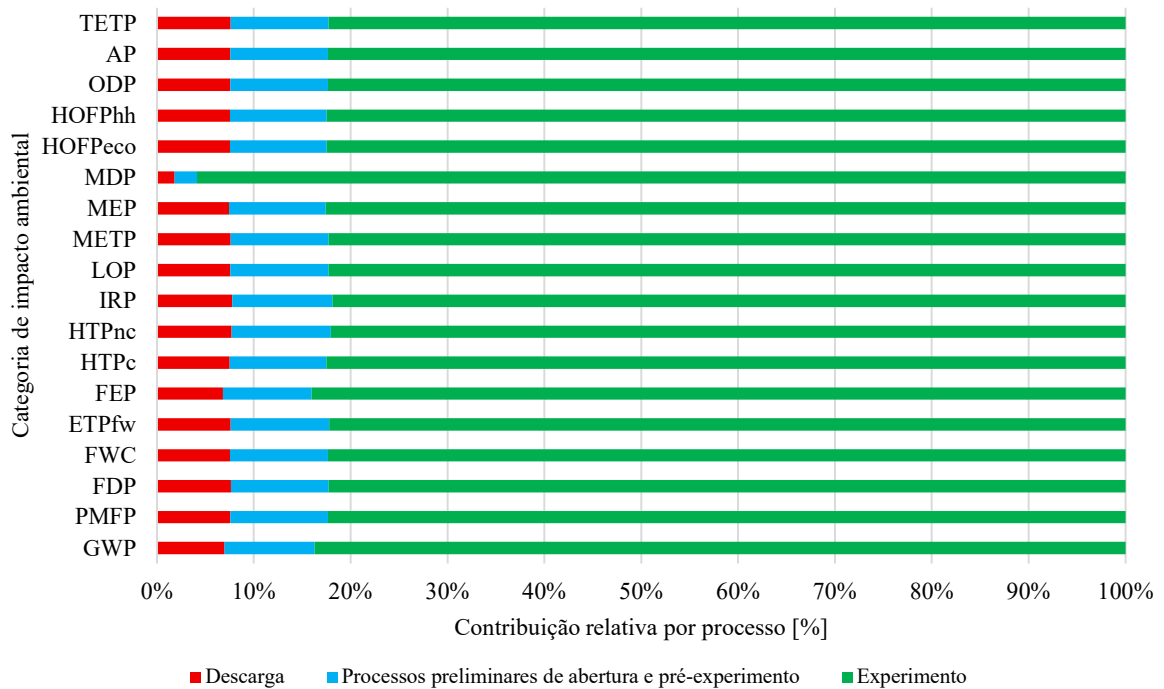
Fonte: elaborado pela própria autora.

Na última etapa tem-se a maior contribuição relativa associada à energia, com exceção da categoria de impacto MDP, conforme apresentado na Figura 18. Essa categoria apresentou 93,28 % de contribuição, em módulo, relacionada à etapa de separação; esse valor é justificado pela obtenção dos produtos oxalato de cobalto e carbonato de lítio. Além disso, destaca-se a categoria de impacto MEP (*Marine Eutrophication*), associada ao potencial de eutrofização marinha, ou seja, ao enriquecimento de nutrientes como nitrogênio (N) e fósforo (P), que podem causar desequilíbrio ecológico, com 74,79 % de contribuição proveniente da produção de ácido oxálico, um processo industrial que envolve reações químicas capazes de liberar efluentes contendo esses compostos (N e P).

A Figura 25 apresenta a normalização para os macroprocessos da tecnologia de reciclagem com água supercrítica. Observa-se que a etapa experimental apresentou maior contribuição para todas as categorias de impacto ambiental. Destaca-se novamente a categoria MDP que apresentou contribuições significativas quando analisada em valores reais, ou seja, sem considerar os valores em módulo. Enquanto a etapa do experimento apresentou uma

contribuição de 124,30 % justificada pela recuperação dos metais, a etapa de descarga apresentou -10,75 % e os processos preliminares de abertura e pré-experimento apresentaram -13,55 %. Cada etapa será analisada em detalhes a seguir.

Figura 25 - Contribuições relativas de cada processo da tecnologia de água supercrítica por categoria de impacto ambiental



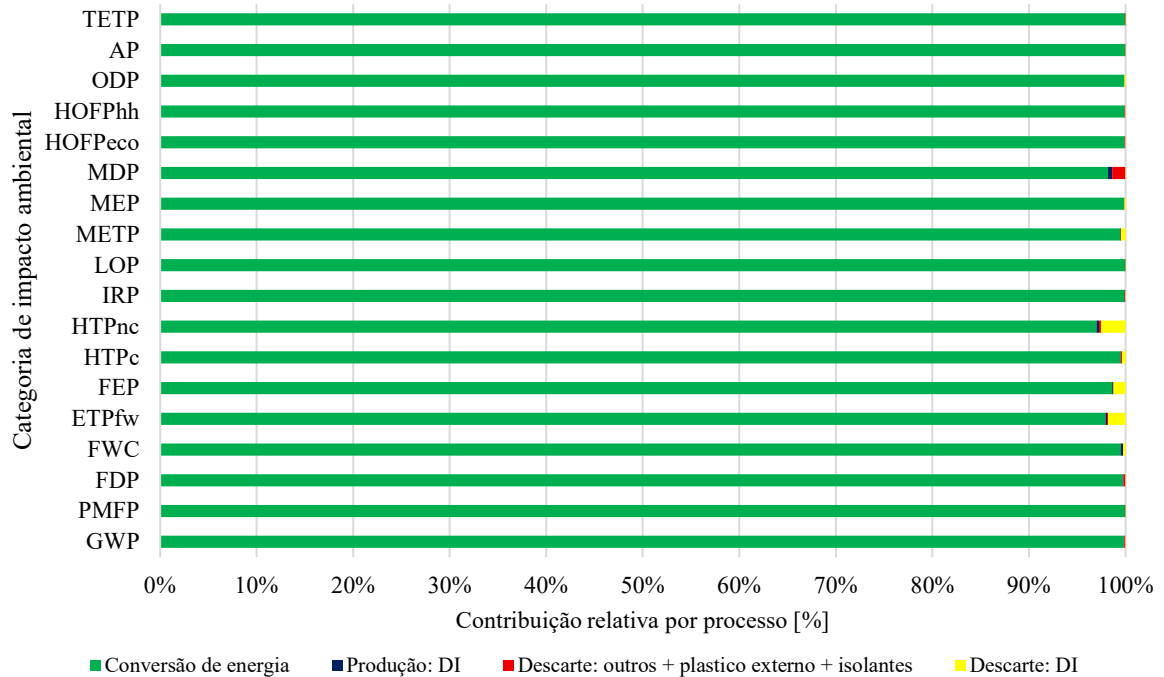
Fonte: elaborado pela própria autora.

As Figuras 26 e 27 mostram as contribuições relativas de cada processo elementar da tecnologia de água supercrítica para cada categoria de impacto ambiental.

Os processos elementares apresentados na Figura 27 são:

- Conversão da Energia - produção de energia elétrica no Brasil em 2025;
- Produção: DI - produção da água deionizada.
- Descarte: outros + plástico externo + isolantes - descarte em aterro sanitário dos materiais das células que caíram durante a desmontagem, pequenos plásticos e fitas presentes nos cases, além do plástico externo e dos isolantes das células;
- Descarte: H₂O - tratamento da água utilizada no aquecimento do reator proveniente do esgoto municipal.

Figura 26 - Contribuições relativas dos processos preliminares de abertura e pré-experimento da tecnologia de água supercrítica para cada categoria de impacto ambiental



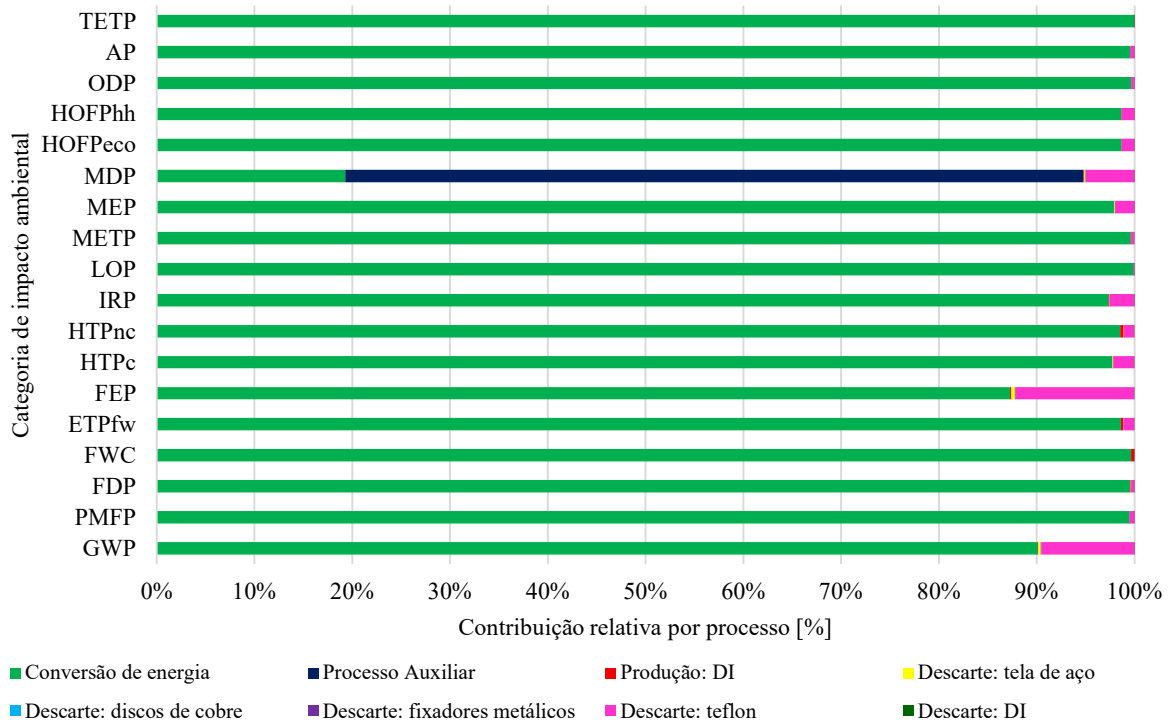
Fonte: elaborado pela própria autora.

Os processos preliminares de abertura e pré-experimento apresentam a conversão da energia como a etapa que mais contribuiu para todas as categorias de impacto ambiental, apresentando valores superiores a 96 %. Essa predominância está associada ao consumo energético das operações iniciais de preparação e estabilização do sistema antes do experimento com água supercrítica.

Os processos elementares apresentados na Figura 27 são:

- Conversão da Energia - produção de energia elétrica no Brasil em 2025;
- Processo auxiliar - montagem, bomba de água, pressurização, pesagem e secagem;
- Descarte: tela de aço, discos de cobre, fixadores metálicos, teflon - descarte em aterro sanitário da tela de aço, dos discos de cobre, dos parafusos, porcas, arruelas e das rebarbas do teflon usados para a montagem do aparato experimental;
- Produção: DI - produção da água deionizada;
- Descarte: DI - tratamento da água proveniente do esgoto municipal.

Figura 27 - Contribuições relativas do processo experimental da tecnologia de água supercrítica para cada categoria de impacto ambiental

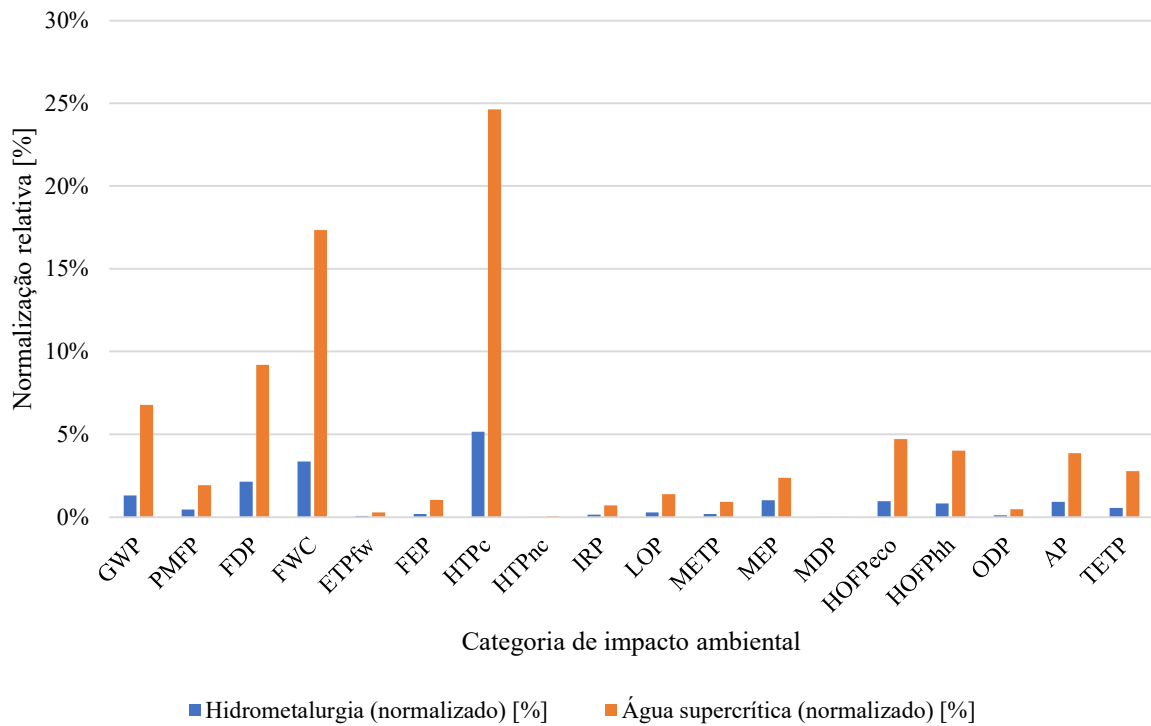


Fonte: elaborado pela própria autora.

Para o processo experimental da tecnologia de água supercrítica nota-se que a maior contribuição está relacionada à conversão da energia em todas as categorias de impacto ambiental. Esse resultado é influenciado principalmente pela etapa de secagem em estufa circulante dos produtos obtidos ao final do experimento, a qual possui duração de 24 horas e elevado consumo energético. A exceção ocorre na categoria de impacto MDP, que possui maior contribuição proveniente do processo auxiliar, no qual tem-se contabilizado a recuperação dos metais como saída do processo.

As contribuições relativas para a descarga são as mesmas apresentadas na Figura 19 e na tabela do Apêndice C, visto que a descarga foi considerada a mesma para as duas rotas de reciclagem.

Para comparar impactos ambientais de diferentes medidas com processos diferentes, foi realizada a normalização externa. Os impactos ambientais foram normalizados conforme a Equação 3 e comparados com a unidade do fator de normalização, considerando este como 100%. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 28.

Figura 28 - Impactos ambientais normalizados por processo

Fonte: elaborado pela própria autora.

É possível notar que a tecnologia de água supercrítica apresentou maiores impactos ambientais em relação à tecnologia hidrometalúrgica, com destaque para os impactos GWP, FDP, FWC e HTP_c (*human toxicity - cancer*, toxicidade humana - câncer), relacionados principalmente com o consumo energético elevado, decorrente da etapa de secagem dos produtos após o experimento por 24 horas. Além disso, apresenta impactos ambientais negativos associados ao uso do PVC que, por ser derivado de recursos fósseis e possuir potencial tóxico, contribui significativamente para categorias de impacto específicas.

4.4. Análise Tecno-Ambiental

A análise tecno-ambiental permitiu relacionar o desempenho técnico, nesse caso a eficiência de recuperação de metais apresentada na Tabela 13, com o desempenho ambiental, representado pelos impactos normalizados da ACV, de ambas as tecnologias estudadas, a partir da Equação 4. Os valores obtidos para a normalização estão apresentados na Tabela 16, assim como os valores da análise tecno-ambiental calculados.

Tabela 16 - Valores normalizados e da avaliação tecno-ambiental para as tecnologias de reciclagem

Categorias de impacto ambiental	Valores normalizados		Avaliação Tecno-Ambiental	
	Hidrometalurgia	Água supercrítica	0,955	1
GWP	5,67E-04	2,96E-03	1,68E+03	3,38E+02
PMFP	1,97E-04	8,36E-04	4,84E+03	1,20E+03
FDP	9,30E-04	4,01E-03	1,03E+03	2,49E+02
FWC	1,46E-03	7,56E-03	6,54E+02	1,32E+02
ETP _{fw}	2,73E-05	1,24E-04	3,50E+04	8,09E+03
FEP	8,13E-05	4,48E-04	1,18E+04	2,23E+03
HTP _c	2,25E-03	1,07E-02	4,24E+02	9,31E+01
HTP _{nc}	3,74E-06	1,56E-05	2,55E+05	6,42E+04
IRP	6,57E-05	3,07E-04	1,45E+04	3,26E+03
LOP	1,17E-04	6,04E-04	8,15E+03	1,66E+03
METP	8,19E-05	4,03E-04	1,17E+04	2,48E+03
MEP	4,38E-04	1,03E-03	2,18E+03	9,72E+02
MDP	6,31E-07	1,02E-06	1,51E+06	9,82E+05
HOP _{Peco}	4,15E-04	2,05E-03	2,30E+03	4,88E+02
HOP _{Phh}	3,53E-04	1,75E-03	2,70E+03	5,73E+02
ODP	4,78E-05	2,06E-04	2,00E+04	4,85E+03
AP	4,02E-04	1,69E-03	2,38E+03	5,93E+02
TETP	2,36E-04	1,21E-03	4,04E+03	8,29E+02
Total	7,68E-03	3,59E-02	1,24E+02	2,78E+01

Fonte: elaborado pela própria autora.

A partir dos valores obtidos, é possível concluir que a hidrometalurgia (124,4237) apresentou um desempenho tecno-ambiental significativamente superior à tecnologia de água supercrítica (27,8254). Esse resultado demonstra que, para uma mesma unidade funcional, a hidrometalurgia oferece maior eficiência de recuperação por unidade de impacto gerado, ou seja, o processo hidrometalúrgico consegue recuperar uma alta fração de metais com menor consumo energético e impactos ambientais reduzidos.

Embora a tecnologia de água supercrítica apresente eficiência de recuperação superior à hidrometalurgia e elimine a necessidade de reagentes ácidos, ela demanda maior consumo energético devido às condições necessárias para atingir as propriedades supercríticas, além de incluir uma etapa de secagem prolongada, que eleva significativamente sua carga ambiental associada à conversão de energia.

Assim, no contexto avaliado, a hidrometalurgia se apresentou com melhor desempenho tecno-ambiental, conciliando bom desempenho técnico e menor impacto ambiental. A tecnologia de água supercrítica apresenta potencial de aprimoramento, podendo alcançar um desempenho ambiental competitivo em termos de eficiência.

Para isso, é necessário que a tecnologia se desenvolva visando a melhoria de sua eficiência energética, possivelmente reduzindo o tempo de pré-aquecimento e investigando a vazão de água mais adequada para permitir que a reação ocorra no menor tempo possível. Além disso, o aumento da capacidade de alimentação do reator pode contribuir na melhoria desses índices, uma vez que a quantidade de energia requerida reduziria significativamente caso o reator fosse capaz de processar a mesma quantidade de material processada pela hidrometalurgia em apenas uma batelada.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta uma revisão da literatura acerca da utilização das tecnologias de hidrometalurgia e água supercrítica para a reciclagem de baterias de íon lítio, podendo ser utilizado como referência em pesquisas com esse tema.

O estado da arte sobre o estudo do desempenho ambiental da tecnologia de hidrometalurgia para a reciclagem de baterias de íon lítio foi identificado e caracterizado a partir dos artigos selecionados após a aplicação dos filtros da revisão sistemática bibliográfica, além de apresentar uma revisão bibliométrica que indica um crescimento da literatura científica sobre o tema.

Considerando especificamente o desempenho ambiental da tecnologia de água supercrítica para a reciclagem de LIB conclui-se que a literatura científica apresenta uma lacuna em pesquisas que detalhem o tema, representando um campo promissor para futuras pesquisas.

Ao comparar a tecnologia de reciclagem por hidrometalurgia para LIBs com a tecnologia de reciclagem por água supercrítica, foi possível concluir que ambas apresentaram forte influência do consumo energético sobre as categorias de impacto ambiental, destacando a conversão de energia como principal contribuinte em grande parte dos processos.

Para a hidrometalurgia, as etapas de reciclagem do ânodo e do cátodo e de secagem mostraram alta demanda elétrica associada ao tempo de operação. Além disso, a categoria MDP (*metal depletion*, esgotamento de metais) apresentou contribuições significativas em algumas etapas, devido a recuperação de metais como cobre, alumínio, grafite, oxalato de cobalto e carbonato de lítio.

Por outro lado, a etapa experimental da tecnologia de água supercrítica concentrou as maiores contribuições para a maior parte das categorias de impacto, o que está relacionado ao tempo de secagem dos produtos e ao elevado consumo energético requerido para manter as condições supercríticas. A categoria MDP novamente se destaca por apresentar contribuições positivas na etapa do processo auxiliar, que contabiliza a recuperação dos metais.

De maneira geral, embora ambas as tecnologias apresentem benefícios ambientais associados à recuperação de materiais de alto valor agregado, o consumo energético ainda é o fator predominante nos impactos. Assim, estratégias de otimização energética, como a integração de fontes renováveis de energia, representam caminhos promissores para minimizar os impactos e tornar ambos os processos mais sustentáveis.

REFERÊNCIAS

ABDELBAKY, M.; SCHWICH, L.; HENRIQUES, J.; FRIEDRICH, B.; PEETERS, J. R.; DEWULF, W. Global warming potential of lithium-ion battery cell production: determining influential primary and secondary raw material supply routes. **Cleaner Logistics and Supply Chain**, v. 9, p. 100130, 1 dez. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2023.100130>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772390923000392>. Acesso em: 09 nov. 2025.

ABHILASH; UMA MAHESWARI, M.; RAGHAVA REDDY, K.; AMINABHAVI, T. M.; ARAVINDAN, V.; MESHARAM, P. Recycling strategies for renewable graphite and other carbon nanomaterials from used batteries: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 493, p. 144871, 15 fev. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144871>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652625002215>. Acesso em: 09 nov. 2025.

ALDAYA, Ivan; OLIVEIRA, José Augusto; CARDOZO FILHO, Lúcio; SANTOS, Mirian Paula; PENCHEL, Rafael Abrantes; BARROS, Thiago Vinícius; MARTINS, Carla Rafaelli; VIEIRA FILHO, Jozue.; OLIVEIRA FILHO, Newton Hygino; SILVA, Fábio Santos; SILVA, Carlos Roberto Ilario. **Processing in subcritical and supercritical water for separation and recovery of metals and metallic oxides from lithium ion batteries, as well as production of hydrogen and light hydrocarbons**. Depositante: Embraer S.A.; Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP). Estados Unidos. US n. 63/518,982. Depósito: 11 ago. 2023.

ALESSIA, A.; ALESSANDRO, B.; MARIA, V. G.; CARLOS, V. A.; FRANCESCA, B. Challenges for sustainable lithium supply: a critical review. **Journal of Cleaner Production**, v. 300, p. 126954, 1 jun. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126954>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621011732>. Acesso em: 06 ago. 2025.

AN, K. Battery electric bus infrastructure planning under demand uncertainty. **Transportation Research Part C: emerging technologies**, v. 111, p. 572–587, 1 fev. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.01.009>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X18314578>. Acesso em: 31 out. 2025.

ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, v. 11, n. 4, p. 959–975, 1 nov. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1751157717300500>. Acesso em: 03 nov. 2025.

AZIMI, G.; CHAN, K. H. A review of contemporary and emerging recycling methods for lithium-ion batteries with a focus on NMC cathodes. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 209, p. 107825, 1 out. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107825>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092134492400418X>. Acesso em: 15 ago. 2025.

AZIMI, G.; MOHAMMAD ZADEH, A. H. Recycling of spent lithium iron phosphate batteries—a review of processes, economics, and carbon footprint. **Waste Management**, v. 209, p. 115203, 1 jan. 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.115203>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X25006142>. Acesso em: 07 nov. 2025.

BARROS, T. V. **Recycling of valuable metals from lithium-ion batteries using supercritical technology**. 2024. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2024.

BARROS, T. V.; CARREGOSA, J. D. C.; WISNIEWSKI, A.; FREITAS, A. C. D.; GUIRARDELLO, R.; FERREIRA-PINTO, L.; BONFIM-ROCHA, L.; JEGATHEESAN, V.; CARDOZO-FILHO, L. Assessment of black liquor hydrothermal treatment under sub- and supercritical conditions: products distribution and economic perspectives. **Chemosphere**, v. 286, p. 131774, 1 jan. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131774>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653521022463>. Acesso em: 25 jul. 2025.

BARROS^a, T. V.; NOTARIO, V. A.; OLIVEIRA, J. A. DE; BISPO, D. F.; FREITAS, L. DOS S.; JEGATHEESAN, V.; CARDOZO-FILHO, L. Recovery of lithium and cobalt from lithium cobalt oxide and lithium nickel manganese cobalt oxide batteries using supercritical water. **Environmental Pollution**, v. 359, p. 124570, 15 out. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124570>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749124012843>. Acesso em: 25 jul. 2025.

BARROS^b, T. V.; OLIVEIRA, J. A. DE; SANTOS, M. P. DOS; BISPO, D. F.; FREITAS, L. DOS S.; JEGATHEESAN, V.; CARDOZO-FILHO, L. Assessment of an eco-efficient process for the optimization of metal recovery in lithium cobalt oxide and lithium nickel manganese cobalt oxide batteries. **Chemosphere**, v. 364, p. 143209, 1 set. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143209>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653524021076>. Acesso em: 25 jul. 2025.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010** — institui a política nacional de resíduos sólidos. Brasília, DF: Presidência da República, [2010]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 30 out. 2025

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos (SINIR). **Relatório nacional de gestão de resíduos sólidos 2020**. Brasília, DF: [s.n.], 2020. Disponível em: <https://relatorios.sinir.gov.br/relatorios/nacional/?ano=2020>. Acesso em: 2 nov. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos (SINIR). **Acordo setorial para implantação de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes**. Brasília, DF: [s.n.], 2019. Disponível em: <https://www.sinir.gov.br/perfis/logistica-reversa/logistica-reversa/eletroeletronicos/>. Acesso em: 30 out. 2025.

BRUNO, M.; FIORE, S. Review of lithium-ion batteries' supply-chain in Europe: material flow analysis and environmental assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 358, p. 120758, 1 maio 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120758>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479724007448>. Acesso em: 08 ago. 2025.

CHEN, J.; MENG, T.; LENG, E.; E, J. Review on metal dissolution characteristics and harmful metals recovery from electronic wastes by supercritical water. **Journal of Hazardous Materials**, v. 424, p. 127693, 15 fev. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127693>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389421026613>. Acesso em: 08 ago. 2025.

CHEN, Q.; LAI, X.; CHEN, J.; YAO, Y.; GUO, Y.; ZHAI, M.; HAN, X.; LU, L.; ZHENG, Y. Comparative environmental impacts of different hydrometallurgical recycling and remanufacturing technologies of lithium-ion batteries considering multi-recycling-approach and temporal-geographical scenarios in China. **Separation and Purification Technology**, v. 324, p. 124642, 1 nov. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124642>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586623015502>. Acesso em: 11 ago. 2025.

CONFORTO, E. C.; AMARAL, D. C.; SILVA, S. L. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO (CBGDP), 8., 2011, Porto Alegre, RS. **Anais [...]**. Porto Alegre: [s.n.], 2011.

CORONA, A.; AMBYE-JENSEN, M.; VEGA, G. C.; HAUSCHILD, M. Z.; BIRKVED, M. Techno-environmental assessment of the green biorefinery concept: combining process simulation and life cycle assessment at an early design stage. **Science of The Total Environment**, v. 635, p. 100–111, 1 set. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.357>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718311173>. Acesso em: 03 nov. 2025.

DENG, H.; WANG, B.; XU, J.; YANG, G.; SHI, Z.; ZHU, H.; HE, W.; LI, G. A comprehensive review of whole process typical hydrometallurgical technologies for recycling waste lithium-ion batteries. **Separation and Purification Technology**, v. 363, p. 132234, 14 ago. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.132234>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586625008317>. Acesso em: 15 ago. 2025.

DONTHU, N.; KUMAR, S.; MUKHERJEE, D.; PANDEY, N.; LIM, W. M. How to conduct a bibliometric analysis: an overview and guidelines. **Journal of Business Research**, v. 133, p. 285–296, 1 set. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0148296321003155>. Acesso em: 03 nov. 2025.

FAHIMI, A.; DUCOLI, S.; FEDERICI, S.; YE, G.; MOUSA, E.; FRONTERA, P.; BONTEMPI, E. 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, 1 mar. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130493>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622001366>. Acesso em: 14 ago. 2025.

FAN, Y.; KONG, Y.; JIANG, P.; ZHANG, G.; CONG, J.; SHI, X.; LIU, Y.; ZHANG, P.; ZHANG, R.; HUANG, Y. Development and challenges of deep eutectic solvents for cathode recycling of end-of-life lithium-ion batteries. **Chemical Engineering Journal**, v. 463, p. 142278, 1 maio 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142278>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894723010094>. Acesso em: 24 jul. 2025.

FÓRUM ECONÔMICO MUNDIAL (FEM). **A vision for a sustainable battery value chain in 2030: unlocking the full potential to power sustainable development and climate change mitigation**. Genebra: World Economic Forum, set. 2019. Disponível em: https://www.globalbattery.org/media/publications/WEF_A_Vision_for_a_Sustainable_Battery_Value_Chain_in_2030_Report.pdf. Acesso em: 22 jul. 2025.

FÓRUM ECONÔMICO MUNDIAL (FEM). **Lithium: the 'white gold' of the energy transition (World Economic Forum)**. 2023. 1 vídeo (01m:56s): Disponível em: <https://www.weforum.org/videos/lithium-energy-transition/>. Acesso em: 22 jul. 2025.

HABIB, K.; HANSDÓTTIR, S. T.; HABIB, H. Critical metals for electromobility: global demand scenarios for passenger vehicles, 2015–2050. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 154, p. 104603, 1 mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104603>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344919305099>. Acesso em: 23 jul. 2025.

HARPER, G. SOMMERVILLE, R.; KENDRICK, E.; DRISCOLL, L.; SLATER, P.; STOLKIN, R.; WALTON, A.; CHRISTENSEN, P.; HEIDRICH, O.; LAMBERT, S.; ABBOTT, A.; RYDER, K.; GAINES, L.; ANDERSON, P. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. **Nature**, v. 575, n. 7781, p. 75–86, 6 nov. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1682-5>. Acesso em: 23 jul. 2025.

HUIJBREGTS, M. A. J.; STEINMANN, Z. J. N.; ELSHOUT, P. M. F.; STAM, G.; VERONES, F.; VIEIRA, M.; ZIJP, M.; HOLLANDER, A.; ZELM, R. VAN. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 2, p. 138–147, 1 fev. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-016-1246-y>. Acesso em: 20 ago. 2025.

INSTITUTO FEDERAL ALEMÃO DE GEOCIÊNCIAS E RECURSOS NATURAIS (BGR). **Germany hopes to mine lithium, the white gold of e-mobility (DW Top Stories/Business)**. 19 ago. 2019. Disponível em: <https://www.dw.com/en/germany-hopes-to-mine-lithium-the-white-gold-of-e-mobility/a-50073822>. Acesso em: 30 out. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 14044:2006**: environmental management – life cycle assessment – requirements and guidelines. Geneva, Switzerland: ISO, 2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 14040:2009**: environmental management — life cycle assessment — principles and framework. Geneva, Switzerland: ISO, 2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 14045:2014**: environmental Management — ecoefficiency — principles and guidelines. Geneva, Switzerland: ISO, 2014. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/43231.html>. Acesso em: 2 nov. 2025.

KELLENS^a, K.; DEWULF, W.; OVERCASH, M.; HAUSCHILD, M. Z.; DUFLOU, J. R. Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life-cycle inventory (UPLCI)-CO2PE! initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 1: methodology description. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 1, p. 69–78, 18 jan. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0340-4>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-011-0340-4>. Acesso em: 20 ago. 2025.

KELLENS^b, K.; DEWULF, W.; OVERCASH, M.; HAUSCHILD, M. Z.; DUFLOU, J. R. Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life cycle inventory (UPLCI) CO2PE! initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 2: case studies. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 2, p. 242–251, 2 fev. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0352-0>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-011-0352-0>. Acesso em: 20 ago. 2025.

KORDE, V. B.; KHELKAR, A. B.; KHOT, S.; MALAVADAKAR, P.; DESHMUKH, P.; AMALRAJ, S. Advancements of lithium-ion battery recycling: transitioning from traditional methods to AI and machine learning techniques. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 225, p. 116180, 1 jan. 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116180>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032125008536>. Acesso em: 07 nov. 2025.

LI, J.; LI, L.; YANG, R.; JIAO, J. Assessment of the lifecycle carbon emission and energy consumption of lithium-ion power batteries recycling: a systematic review and meta-analysis. **Journal of Energy Storage**, v. 65, p. 107306, 15 ago. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107306>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X2300703X>. Acesso em: 11 ago. 2025.

LI, K.; XU, Z. A review of current progress of supercritical fluid technologies for e-waste treatment. **Journal of Cleaner Production**, v. 227, p. 794–809, 1 ago. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.104>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619311813>. Acesso em: 14 ago. 2025.

LI, P.; LUO, S.; ZHANG, L.; LIU, Q.; WANG, Y.; LIN, Y.; XU, C.; GUO, J.; CHEALI, P.; XIA, X. Progress, challenges, and prospects of spent lithium-ion batteries recycling: a review. **Journal of Energy Chemistry**, v. 89, p. 144–171, 1 fev. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.10.012>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095495623005776>. Acesso em: 15 ago. 2025.

LI, W.; LI, P.; SONG, B.; YUE, P.; GAO, Y.; CAO, D.; ZHU, K. Research progress on membrane filtration technology for recycling spent lithium-ions batteries. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 13, n. 6, p. 120353, 1 dez. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.120353>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221334372505050X>. Acesso em: 05 jan. 2026.

LI, Y.; WANG, S.; XU, TONGTONG; LI, J.; ZHANG, Y.; XU, TIANTIAN; YANG, J. Novel designs for the reliability and safety of supercritical water oxidation process for sludge treatment. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 149, p. 385–398, 1 maio 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.10.049>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582020318528>. Acesso em: 05 nov. 2025.

LIU, Z.; LIU, G.; CHENG, L.; GU, J.; YUAN, H.; CHEN, Y.; WU, Y. Development of sustainable and efficient recycling technology for spent li-ion batteries: traditional and transformation go hand in hand. **Green Energy & Environment**, v. 9, n. 5, p. 802–830, 1 maio 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gee.2023.09.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468025723001267>. Acesso em: 15 ago. 2025.

MARTINS, C. R. **Proposta de um sistema de descarga de baterias de íon lítio visando a sua reciclagem**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, UNESP, Câmpus de São João da Boa Vista, 2022.

MAYYAS, A.; STEWARD, D.; MANN, M. The case for recycling: overview and challenges in the material supply chain for automotive li-ion batteries. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 19, p. e00087, 1 abr. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2018.e00087>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993718302926>. Acesso em: 31 out. 2025.

MESHARAM, P.; MISHRA, A.; ABHILASH; SAHU, R. Environmental impact of spent lithium-ion batteries and green recycling perspectives by organic acids – a review. **Chemosphere**, v. 242, p. 125291, 1 mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125291>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653519325317>. Acesso em: 08 nov. 2025.

MILIAN, Y. E.; JAMETT, N.; CRUZ, C.; HERRERA-LEÓN, S.; CHACANA-OLIVARES, J. A comprehensive review of emerging technologies for recycling spent lithium-ion batteries. **Science of The Total Environment**, v. 910, p. 168543, 1 fev. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168543>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723071711>. Acesso em: 24 jul. 2025.

NASERI, T.; MOUSAVI, S. M.; LIESE, A.; KUCHTA, K. Bioleaching of valuable metals from spent LIBs followed by selective recovery of manganese using the precipitation method: metabolite maximization and process optimization. **Journal of Environmental**

Management, v. 343, p. 118197, 1 out. 2023. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118197>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479723009854?via%3Dihub>. Acesso em: 24 jul. 2025.

NATARAJAN, S.; NODA, S. Advancements in direct recycling technologies for lithium-ion battery cathodes: overcoming challenges in cathode regeneration. **Materials Science and Engineering: r: reports**, v. 164, p. 100976, 1 jun. 2025. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.mser.2025.100976>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927796X25000531?via%3Dihub>. Acesso em: 24 jul. 2025.

NSHIZIRUNGU, T.; RANA, M.; JO, Y. T.; PARK, J. H. Rapid leaching and recovery of valuable metals from spent lithium ion batteries (LIBs) via environmentally benign subcritical nickel-containing water over chlorinated polyvinyl chloride. **Journal of Hazardous Materials**, v. 396, p. 122667, 5 set. 2020. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122667>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389420306567>. Acesso em: 16 nov. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Transformando nosso mundo: a agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável**. Nova York: [s.n.]. 2015. Disponível em:

<https://www.gov.br/secretariageral/pt-br/cnods/agenda-2030>. Acesso em: 2 nov. 2025.

PANDIT, S.; RHITHUPARNA, D.; SIKDER, J.; HALDER, G. Advances in membrane technology for sustainable treatment of coal bed methane produced water: a paradigm shift. **Separation and Purification Technology**, v. 363, p. 132046, 14 ago. 2025. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.132046>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586625006434>. Acesso em: 24 jul. 2025.

PREMATHILAKE, D. S.; AMBAYE, T. G.; BOTELHO JUNIOR, A. B.; LIMA, A. T. M.; ESPINOSA, D. C. R.; VACCARI, M. Comparative environmental and economic assessment of emerging hydrometallurgical recycling technologies for li-ion battery cathodes.

Sustainable Production and Consumption, v. 51, p. 327–344, 1 nov. 2024. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.09.015>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352550924002720>. Acesso em: 14 jul. 2025.

RONCHINI, C. M. B. R. **Separação do Material Catódico e Anódico de Baterias de Íon Lítio**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, São João da Boa Vista, 2022.

SAMBAMURTHY, S.; RAGHUVANSHI, S.; SANGWAN, K. S. Environmental impact of recycling spent lithium-ion batteries. **Procedia CIRP**, v. 98, p. 631–636, 1 jan. 2021. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.166>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827121001979>. Acesso em: 03 nov. 2025.

SANTOS, M. P.; GARDE, I. A. A.; RONCHINI, C. M. B.; FILHO, L. C.; SOUZA, G. B. M. DE; ABBADE, M. L. F.; REGONE, N. N.; JEGATHEESAN, V. (JEGA); OLIVEIRA, J. A. DE. A technology for recycling lithium-ion batteries promoting the circular economy: the RecycLib. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 175, p. 105863, 1 dez. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105863>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344921004729>. Acesso em: 24 jul. 2025.

SCHIAVI, P. G.; ALTIMARI, P.; BRANCHI, M.; ZANONI, R.; SIMONETTI, G.; NAVARRA, M. A.; PAGNANELLI, F. Selective recovery of cobalt from mixed lithium ion battery wastes using deep eutectic solvent. **Chemical Engineering Journal**, v. 417, p. 129249, 1 ago. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129249>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S138589472100838X>. Acesso em: 24 jul. 2025.

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, 1 mar. 2022. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231015>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775322000404>. Acesso em: 24 jul. 2025.

SHI, H.; ZHANG, J.; OU, L. A comprehensive review on the separation and purification of valuable metals from the leachate of spent lithium-ion batteries. **Separation and Purification Technology**, v. 360, p. 130847, 8 jul. 2025. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.130847>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586624045866>. Acesso em: 08 ago. 2025.

SMITH, D. C. The importance of lithium in achieving a low-carbon future: opportunities galore, but coupled with key challenges for legal professionals. **Journal of Energy and Natural Resources Law**, v. 38, n. 1, p. 1–4, 2 jan. 2020. DOI:

<https://doi.org/10.1080/02646811.2020.1706821>. Disponível em:

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02646811.2020.1706821>. Acesso em: 31 out. 2025.

SOFIAN, A. D. A. B. A.; MAJID, S. R.; KANG, K.; KIM, J.-K.; SHOW, P. L. Upcycling and recycling of spent battery waste for a sustainable future: progress and perspectives. **Progress in Materials Science**, v. 153, p. 101478, 1 set. 2025. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2025.101478>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642525000532>. Acesso em: 24 jul. 2025.

SONG, D.; YU, J.; WANG, M.; TAN, Q.; LIU, K.; LI, J. Advancing recycling of spent lithium-ion batteries: from green chemistry to circular economy. **Energy Storage Materials**, v. 61, p. 102870, 1 ago. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2023.102870>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405829723002490>. Acesso em: 08 nov. 2025.

SOUZA, G. B. M.; PEREIRA, M. B.; SANTOS, L. F.; ALONSO, C. G.; JEGATHEESAN, V.; CARDOZO-FILHO, L. Management of waste printed circuit boards via supercritical water technology. **Journal of Cleaner Production**, v. 368, p. 133198, 25 set. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133198>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965262202786X>. Acesso em: 25 jul. 2025.

UNIÃO EUROPEIA (UE). **Diretiva n.º 2012/19/UE, de 4 de julho de 2012**. Relativa aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE). Jornal Oficial da União Europeia, 2012. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2012/19/oj/eng>. Acesso em: 30 out. 2025

WANG, L.; WANG, P.; CHEN, W. Q.; WANG, Q. Q.; LU, H. S. Environmental impacts of scandium oxide production from rare earths tailings of Bayan Obo Mine. **Journal of Cleaner Production**, v. 270, p. 122464, 10 out. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122464>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620325117>. Acesso em: 09 nov. 2025.

WANG, M.; LIU, K.; YU, J.; ZHANG, Q.; ZHANG, Y.; VALIX, M.; TSANG, D. C. W. Challenges in recycling spent lithium-ion batteries: spotlight on polyvinylidene fluoride removal. **Global Challenges**, v. 7, n. 3, p. 2200237, 1 mar. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/gch2.202200237>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/gch2.202200237>. Acesso em: 24 jul. 2025.

WISZNIEWSKI, L.; LALROPUA, L.; SPIESS, S.; PRESOLY, P.; KREMSER, K.; DOSCHEK-HELD, K.; GUEBITZ, G. M.; RAONIC, Z. Integrating pyro- and biohydrometallurgy in a green closed-loop lithium-ion battery recycling approach. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 13, n. 3, p. 116811, 1 jun. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116811>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343725015076>. Acesso em: 24 jul. 2025.

WU, F.; LI, L.; CRANDON, L.; CAO, Y.; CHENG, F.; HICKS, A.; ZENG, E. Y.; YOU, J. Environmental hotspots and greenhouse gas reduction potential for different lithium-ion battery recovery strategies. **Journal of Cleaner Production**, v. 339, p. 130697, 10 mar. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130697>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622003365>. Acesso em: 14 ago. 2025.

XIAO, Y.; GOYAL, G. K.; SU, J.; ABBASI, H.; YAN, H.; YAO, X.; TANTRATIAN, K.; YAN, Z.; ALKSNINIS, A.; PHIPPS, M.; HERNLEY, P.; WANG, Q.; ZUO, L.; CHEN, L. A comprehensive review of electric vehicle recycling: processes in selective collection, element extraction, and component regeneration. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 219, p. 108309, 1 jun. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108309>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344925001880>. Acesso em: 15 ago. 2025.

YU, M.; BAI, B.; XIONG, S.; LIAO, X. Evaluating environmental impacts and economic performance of remanufacturing electric vehicle lithium-ion batteries. **Journal of Cleaner**

Production, v. 321, p. 128935, 25 out. 2021. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128935>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621031280>. Acesso em: 14 ago. 2025.

ZHANG, N.; GUO, M.; BU, X.; JIN, C. Understanding green loyalty: a literature review based on bibliometric-content analysis. **Heliyon**, v. 9, n. 7, p. e18029, 1 jul. 2023. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18029>. Disponível em:

[https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(23\)05237-4](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(23)05237-4). Acesso em: 03 nov. 2025.

ZHANG, X.; ZHU, M. Recycling spent lithium-ion battery cathode: an overview. **Green**

Chemistry, v. 26, n. 13, p. 7656–7717, 1 jul. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1039/d4gc01781a>.

Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2024/gc/d4gc01781a>. Acesso em: 14 ago. 2025.

APÊNDICE A - Processos de entrada e saída

Processos utilizados na modelagem da ACV no software *LCA for Experts*

Planos	Nome	Descrição
Processos de Entrada		
Discharge Final, Opening, Anode Recycling, Cathode Recycling, Plastic Recycling, Metal Separation, Opening, Separation and Heating, Experiment	BR: Electricity grid mix 1kV-60kV (2025)	Fornecimento de eletricidade em média tensão (1kV a 60 kV), considerando diferentes matrizes energéticas nacionais em 2025.
Discharge Final, Anode Recycling, Cathode Recycling, Metal Separation, Opening, Separation and Heating, Experiment	US: Water deionized Sphera	Produção de água deionizada, altamente pura, via troca iônica.
Discharge	BR: EAF Steel billet / slab / bloom Sphera	Produção de aço em usina siderúrgica elétrica.
	RER: Iron (II) sulphate Sphera	Produção do sulfato de ferro.
Anode Recycling, Cathode Recycling	RER: Sodium hydroxide (caustic soda) mix (100%) Sphera	Produção de hidróxido de sódio.
Metal Separation	Sodium carbonate (Soda, Na ₂ CO ₃) via Solvay process	Produção do carbonato de sódio.
	ROW: Oxalic Acid CRM	Produção de ácido oxálico (literatura)
Processos de Saída		
Discharge, Anode Recycling, Cathode Recycling, Plastic Recycling, Metal Separation, Opening, Separation and Heating	RER: Municipal wastewater treatment (mix) Sphera	Tratamento de águas residuais provenientes de esgotos municipais.
Discharge, Opening, Opening, Separation and Heating	DE: Hazardous waste (no C, incl. landfilling)	Tratamento em aterro sanitário de resíduos inorgânicos perigosos.
Experiment	RER: Municipal waste landfill (EN15804 C4)	Tratamento em aterro sanitário de resíduos municipais.

APÊNDICE B - Fluxos de entrada e saída

Fluxos utilizados na modelagem da ACV no software *LCA for Experts*

IOs	Entradas	Saídas	Fluxos no <i>LCA for Experts</i>	Origem
Eletricidade	X		Electricity [Electric power]	Estimado
Bateria LCO	X	X	Lithium cobalt oxide battery (LiCoO ₂ , LCO) [Components]	Medido
Aço carbono	X	X	Iron oxide (ferrite) [Inorganic intermediate products]	Medido/Estimado
Água deionizada	X	X	Water (deionised) [Operating materials]	Medido/Calculado
Sulfato de ferro	X		Iron sulphate dissolution [Inorganic intermediate products]	Medido
Solução de sulfato de ferro		X	Iron sulphate dissolution [Inorganic intermediate products]	Estimado
		X	Water (deionised) [Operating materials]	Estimado
Case e eixo		X	steel scrap product [Metals]	Calculado
Eletrólito		X	Electrolytic steam [Inorganic emissions to air]	Calculado
Outros + plástico externo + isolantes		X	Hazardous waste for land-filling [Hazardous waste for disposal]	Calculado
Grafite	X	X	RER: graphite, at plant [inorganics]	Calculado
Lâminas de cobre	X	X	Copper sheet [Metals]	Calculado
Lâminas de alumínio	X	X	Aluminium foil [Metals]	Calculado
Óxido de lítio e cobalto (LiCoO ₂)	X	X	GLO: lithium cobalt oxide [Operating materials]	Calculado
Polipropileno (PP)	X	X	Polypropylene (PP) [Waste for recovery]	Calculado
Hidróxido de sódio	X		Sodium hydroxide (100%; caustic soda) [Inorganic intermediate products]	Medido
Solução de hidróxido de sódio		X	Sodium hydroxide (100%; caustic soda) [Inorganic intermediate products]	Estimado
		X	Water (deionised) [Operating materials]	Estimado
Grafite		X	Graphite [Non renewable resources]	Calculado
Lâminas de cobre		X	Copper [Non renewable elements]	Calculado
Lâminas de alumínio		X	Aluminium [Non renewable elements]	Calculado
Água		X	Wastewater [Production residues in life cycle]	Medido/Estimado
Água	X		Fresh water, regionalized, BR [Water]	Medido
Ácido oxálico	X		Oxalic acid [Organic intermediate products]	Calculado
Carbonato de sódio (Na ₂ CO ₃)	X		Soda (sodium carbonate) [Inorganic intermediate products]	Calculado
Oxalato de cobalto		X	Cobalt [Non renewable elements]	Calculado
		X	Oxalic acid [Organic intermediate products]	Calculado
Carbonato de lítio		X	Lithium [Non renewable elements]	Calculado
		X	Soda (sodium carbonate) [Inorganic intermediate products]	Calculado
Óxido não separado		X	GLO: lithium cobalt oxide [Operating materials]	Medido
PVC	X	X	Polyvinylchloride granulate (PVC) [Plastics]	Calculado
Disco de cobre	X	X	Coppersheet [Metals]	Calculado
Teflon	X	X	Polytetrafluoroethylene fibers (PTFE) [Plastics]	Calculado
Aço inox	X	X	Stainless steel screw [Metals]	Calculado
Tela de aço	X	X	Steel [Metals]	Calculado

IOs	Entradas	Saídas	Fluxos no <i>LCA for Experts</i>	Origem
Dióxido de carbono		X	Carbon dioxide [Inorganic emissions to air]	Calculado
Monóxido de carbono		X	Carbon monoxide [Inorganic emissions to air]	Calculado
Etano		X	Ethane [Group NMVOC to air]	Calculado
Gás hidrogênio		X	Hydrogen [Inorganic emissions to air]	Calculado
Metano		X	Methane [Organic emissions to air (group VOC)]	Calculado
Vapor de água		X	Water vapour [Inorganic emissions to air]	Calculado
Óxido de cobalto (CoO)		X	Cobalt [Non renewable elements]	Calculado
		X	Wastewater [Production residues in life cycle]	Calculado
Cloreto de cobre (CuCl ₂)		X	Copper [Non renewable elements]	Calculado
		X	Wastewater [Production residues in life cycle]	Calculado
Hidróxido de lítio (LiOH)		X	Lithium [Non renewable elements]	Calculado
		X	Wastewater [Production residues in life cycle]	Calculado
Óxido de manganês (MnO ₂)		X	Manganese [Non renewable elements]	Calculado
		X	Wastewater [Production residues in life cycle]	Calculado
Óxido de níquel (NiO)		X	Nickel [Non renewable elements]	Calculado
		X	Wastewater [Production residues in life cycle]	Calculado
Cloreto de cobalto (CoCl ₂)		X	Cobalt [Non renewable elements]	Calculado
		X	Wastewater [Production residues in life cycle]	Calculado
Carbonato de lítio (Li ₂ CO ₂)		X	Lithium [Non renewable elements]	Calculado
		X	Wastewater [Production residues in life cycle]	Calculado
Cloreto de manganês (MnCl ₂)		X	Manganese [Non renewable elements]	Calculado
		X	Wastewater [Production residues in life cycle]	Calculado
Cloreto de níquel (NiCl ₂)		X	Nickel [Non renewable elements]	Calculado
		X	Wastewater [Production residues in life cycle]	Calculado
Carbono sólido		X	Carbon [Organic intermediate products]	Calculado

APÊNDICE C - Contribuições relativas - processo de descarga

Contribuições relativas de cada processo elementar do processo de descarga para cada categoria de impacto ambiental

	Conversão de energia	Produção: aço	Produção: FeSO4	Produção: DI	Descarte: aço	Descarte: H2O	Descarte: H2O
GWP	99,3224%	0,1139%	0,0526%	0,0224%	0,4739%	0,0146%	0,0002%
PMFP	99,4286%	0,1320%	0,2463%	0,0076%	0,1822%	0,0033%	0,0001%
FDP	98,7574%	0,1306%	0,2427%	0,0440%	0,8174%	0,0079%	0,0001%
FWC	99,6015%	0,0585%	0,0022%	0,1649%	0,0075%	0,1629%	0,0025%
ETPfw	98,0420%	0,0769%	0,2164%	0,1155%	0,4058%	1,1263%	0,0171%
FEP	99,0037%	0,0448%	0,0356%	0,0821%	0,0423%	0,7797%	0,0119%
HTPc	98,6818%	0,2976%	0,2532%	0,0283%	0,5248%	0,2111%	0,0032%
HTPnc	96,7025%	0,2694%	0,4365%	0,1800%	0,8077%	1,5798%	0,0240%
IRP	99,6292%	0,0484%	0,0771%	0,0444%	0,1788%	0,0218%	0,0003%
LOP	99,8627%	0,0544%	0,0172%	0,0021%	0,0622%	0,0013%	0,0000%
METP	99,1751%	0,1653%	0,1142%	0,0305%	0,2373%	0,2735%	0,0042%
MEP	99,8385%	0,0440%	0,0057%	0,0096%	0,0178%	0,0831%	0,0013%
MDP	92,6389%	0,3727%	1,2003%	0,2500%	5,5206%	0,0173%	0,0003%
HOFPeco	99,4135%	0,1434%	0,0773%	0,0141%	0,3453%	0,0063%	0,0001%
HOFPhh	99,4166%	0,1436%	0,0751%	0,0141%	0,3440%	0,0064%	0,0001%
ODP	99,7387%	0,0517%	0,0298%	0,0098%	0,0947%	0,0742%	0,0011%
AP	99,4536%	0,1196%	0,2544%	0,0075%	0,1617%	0,0032%	0,0000%
TETP	99,5433%	0,2485%	0,0290%	0,0021%	0,1750%	0,0020%	0,0000%

APÊNDICE D - Contribuições relativas - processo de abertura da hidrometalurgia

Contribuições relativas de cada processo elementar do processo de abertura da hidrometalurgia para cada categoria de impacto ambiental

	Conversão de energia	Descarte: outros + plástico externo + isolantes
GWP	30,64%	69,36%
PMFP	53,50%	46,50%
FDP	20,30%	79,70%
FWC	96,55%	3,45%
ETPfw	33,74%	66,26%
FEP	83,15%	16,85%
HTPc	28,39%	71,61%
HTPnc	20,15%	79,85%
IRP	54,01%	45,99%
LOP	77,19%	22,81%
METP	46,84%	53,16%
MEP	92,19%	7,81%
MDP	3,42%	96,58%
HOFPeco	37,77%	62,23%
HOFPhh	37,86%	62,14%
ODP	68,95%	31,05%
AP	56,46%	43,54%
TETP	54,53%	45,47%

APÊNDICE E - Contribuições relativas - reciclagem do ânodo da hidrometalurgia

Contribuições relativas de cada processo elementar do processo de reciclagem do ânodo da hidrometalurgia para cada categoria de impacto ambiental

	Conversão de energia	Separação do Ânodo	Produção: NaOH	Produção: DI	Descarte: NaOH	Descarte: DI
GWP	46,57%	0,00%	44,14%	5,59%	3,65%	0,05%
PMFP	68,34%	0,00%	27,65%	2,79%	1,20%	0,02%
FDP	28,90%	0,00%	63,00%	6,85%	1,23%	0,02%
FWC	35,17%	0,00%	2,73%	31,00%	30,64%	0,46%
ETPfw	11,70%	0,00%	8,33%	7,34%	71,57%	1,07%
FEP	16,53%	0,00%	5,81%	7,30%	69,32%	1,04%
HTPc	36,95%	0,00%	14,68%	5,65%	42,09%	0,63%
HTPnc	9,05%	0,00%	2,07%	8,97%	78,73%	1,18%
IRP	13,16%	0,00%	82,17%	3,12%	1,53%	0,02%
LOP	75,26%	0,00%	23,36%	0,84%	0,53%	0,01%
METP	34,02%	0,00%	9,70%	5,57%	49,96%	0,75%
MEP	60,73%	0,00%	8,83%	3,12%	26,92%	0,40%
MDP	0,35%	98,68%	0,43%	0,50%	0,03%	0,00%
HOFPeco	51,40%	0,00%	42,96%	3,87%	1,74%	0,03%
HOFPhh	51,24%	0,00%	43,10%	3,88%	1,75%	0,03%
ODP	52,22%	0,00%	24,04%	2,73%	20,69%	0,31%
AP	68,98%	0,00%	27,06%	2,77%	1,18%	0,02%
TETP	85,27%	0,00%	12,85%	0,96%	0,91%	0,01%

APÊNDICE F - Contribuições relativas - reciclagem do cátodo da hidrometalurgia

Contribuições relativas de cada processo elementar do processo de reciclagem do cátodo da hidrometalurgia para cada categoria de impacto ambiental

	Conversão de energia	Separação do Cátodo	Produção: NaOH	Produção: DI	Descarte: NaOH	Descarte: DI	Descarte: H2O
GWP	99,02%	0,00%	0,71%	0,16%	0,06%	0,0009%	0,05%
PMFP	99,61%	0,00%	0,31%	0,06%	0,01%	0,0002%	0,01%
FDP	98,00%	0,00%	1,62%	0,32%	0,03%	0,0005%	0,03%
FWC	97,59%	0,00%	0,06%	1,18%	0,65%	0,0097%	0,52%
ETPfw	91,04%	0,00%	0,49%	0,78%	4,24%	0,0635%	3,39%
FEP	93,75%	0,00%	0,25%	0,57%	2,99%	0,0449%	2,39%
HTPc	97,96%	0,00%	0,30%	0,21%	0,85%	0,0127%	0,68%
HTPnc	88,07%	0,00%	0,15%	1,20%	5,83%	0,0874%	4,66%
IRP	95,02%	0,00%	4,51%	0,31%	0,08%	0,0013%	0,07%
LOP	99,74%	0,00%	0,24%	0,02%	0,01%	0,0001%	0,00%
METP	97,59%	0,00%	0,21%	0,22%	1,09%	0,0164%	0,87%
MEP	99,21%	0,00%	0,11%	0,07%	0,33%	0,0050%	0,27%
MDP	84,62%	12,81%	0,79%	1,66%	0,06%	0,0010%	0,05%
HOFPeco	99,22%	0,00%	0,63%	0,10%	0,03%	0,0004%	0,02%
HOFPhh	99,22%	0,00%	0,63%	0,10%	0,03%	0,0004%	0,02%
ODP	99,04%	0,00%	0,35%	0,07%	0,30%	0,0045%	0,24%
AP	99,62%	0,00%	0,30%	0,05%	0,01%	0,0002%	0,01%
TETP	99,86%	0,00%	0,11%	0,02%	0,01%	0,0001%	0,01%

APÊNDICE G - Contribuições relativas - reciclagem do plástico da hidrometalurgia

Contribuições relativas de cada processo elementar do processo de reciclagem do plástico da hidrometalurgia para cada categoria de impacto ambiental

	Conversão de energia	Limpeza do plástico	Descarte: H2O
GWP	85,53%	0,00%	14,47%
PMFP	96,33%	0,00%	3,67%
FDP	91,58%	0,00%	8,42%
FWC	20,96%	39,60%	39,44%
ETPfw	7,04%	0,00%	92,96%
FEP	9,94%	0,00%	90,06%
HTPc	28,90%	0,00%	71,10%
HTPnc	5,05%	0,00%	94,95%
IRP	79,91%	0,00%	20,09%
LOP	98,50%	0,00%	1,50%
METP	23,97%	0,00%	76,03%
MEP	51,09%	0,00%	48,91%
MDP	82,34%	0,00%	17,66%
HOFPeco	93,19%	0,00%	6,81%
HOFPhh	93,15%	0,00%	6,85%
ODP	53,89%	0,00%	46,11%
AP	96,45%	0,00%	3,55%
TETP	97,75%	0,00%	2,25%

APÊNDICE H - Contribuições relativas - separação do metal da hidrometalurgia

Contribuições relativas de cada processo elementar do processo de separação do metal da hidrometalurgia para cada categoria de impacto ambiental

	Conversão de energia	Separação	Produção: Na₂CO₃	Produção: C₂H₂O₄	Produção: DI	Descarte: H₂O
GWP	83,98%	0,00%	1,43%	14,43%	0,09%	0,06%
PMFP	64,59%	0,00%	1,17%	34,20%	0,02%	0,01%
FDP	67,88%	0,00%	1,50%	30,45%	0,15%	0,03%
FWC	97,62%	0,00%	0,07%	0,69%	0,80%	0,82%
ETPfw	78,31%	0,00%	0,35%	16,27%	0,46%	4,62%
FEP	94,37%	0,00%	0,13%	1,30%	0,39%	3,82%
HTPc	81,31%	0,00%	0,24%	17,44%	0,12%	0,89%
HTPnc	67,28%	0,00%	0,47%	25,99%	0,62%	5,64%
IRP	86,17%	0,00%	0,38%	13,16%	0,19%	0,10%
LOP	98,85%	0,00%	0,10%	1,04%	0,01%	0,01%
METP	89,81%	0,00%	0,16%	8,62%	0,14%	1,27%
MEP	24,87%	0,00%	0,23%	74,79%	0,01%	0,11%
MDP	5,41%	93,28%	0,95%	0,29%	0,07%	0,01%
HOFPeco	87,96%	0,00%	1,86%	10,09%	0,06%	0,03%
HOFPhh	87,98%	0,00%	1,88%	10,05%	0,06%	0,03%
ODP	67,12%	0,00%	0,14%	32,45%	0,03%	0,26%
AP	63,30%	0,00%	1,41%	35,26%	0,02%	0,01%
TETP	96,72%	0,00%	0,05%	3,22%	0,01%	0,01%

APÊNDICE I - Contribuições relativas - processos preliminares da água supercrítica

Contribuições relativas de cada processo elementar dos processos preliminares de abertura e pré-experimento da tecnologia de água supercrítica para cada categoria de impacto ambiental

	Conversão de energia	Produção: DI	Descarte: outros + plástico externo + isolantes	Descarte: DI
GWP	99,83%	0,04%	0,11%	0,02%
PMFP	99,94%	0,01%	0,04%	0,01%
FDP	99,73%	0,07%	0,19%	0,01%
FWC	99,47%	0,26%	0,00%	0,26%
ETPfw	97,92%	0,18%	0,09%	1,80%
FEP	98,61%	0,13%	0,01%	1,25%
HTPc	99,49%	0,05%	0,12%	0,34%
HTPnc	96,98%	0,29%	0,19%	2,54%
IRP	99,85%	0,07%	0,04%	0,04%
LOP	99,98%	0,00%	0,01%	0,00%
METP	99,46%	0,05%	0,06%	0,44%
MEP	99,85%	0,02%	0,00%	0,13%
MDP	98,19%	0,42%	1,35%	0,03%
HOFPeco	99,89%	0,02%	0,08%	0,01%
HOFPhh	99,89%	0,02%	0,08%	0,01%
ODP	99,84%	0,02%	0,02%	0,12%
AP	99,95%	0,01%	0,04%	0,01%
TETP	99,95%	0,00%	0,04%	0,00%

APÊNDICE J - Contribuições relativas - processo experimental da água supercrítica

Contribuições relativas de cada processo elementar do processo experimental da tecnologia de água supercrítica para cada categoria de impacto ambiental

	Conversão de energia	Processo Auxiliar	Produção: DI	Descarte: tela de aço	Descarte: discos de cobre	Descarte: fixadores metálicos	Descarte: teflon	Descarte: DI
GWP	90,11%	0,01%	0,04%	0,26%	0,008%	0,047%	9,525%	0,0003%
PMFP	99,50%	0,00%	0,02%	0,01%	0,000%	0,002%	0,465%	0,0001%
FDP	99,54%	0,00%	0,09%	0,01%	0,000%	0,002%	0,356%	0,0002%
FWC	99,65%	0,00%	0,33%	0,00%	0,000%	0,000%	0,019%	0,0031%
ETPfw	98,62%	0,00%	0,23%	0,03%	0,001%	0,005%	1,091%	0,0214%
FEP	87,28%	0,00%	0,14%	0,34%	0,010%	0,060%	12,154%	0,0130%
HTPc	97,71%	0,00%	0,06%	0,06%	0,002%	0,011%	2,157%	0,0040%
HTPnc	98,54%	0,00%	0,36%	0,03%	0,001%	0,005%	1,037%	0,0304%
IRP	97,31%	0,00%	0,09%	0,07%	0,002%	0,012%	2,517%	0,0004%
LOP	99,91%	0,00%	0,00%	0,00%	0,000%	0,000%	0,084%	0,0000%
METP	99,62%	0,00%	0,06%	0,01%	0,000%	0,001%	0,299%	0,0052%
MEP	97,93%	0,00%	0,02%	0,06%	0,002%	0,010%	1,987%	0,0015%
MDP	19,28%	75,48%	0,10%	0,14%	0,004%	0,025%	4,965%	0,0001%
HOFPeco	98,64%	0,00%	0,03%	0,04%	0,001%	0,006%	1,293%	0,0001%
HOFPhh	98,64%	0,00%	0,03%	0,04%	0,001%	0,006%	1,288%	0,0001%
ODP	99,67%	0,00%	0,02%	0,01%	0,000%	0,001%	0,300%	0,0014%
AP	99,56%	0,00%	0,01%	0,01%	0,000%	0,002%	0,410%	0,0001%
TETP	99,99%	0,00%	0,00%	0,00%	0,000%	0,000%	0,006%	0,0000%