

FACULDADE DE ENGENHARIA, CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

LARISSA ARAUJO PASSOS

SISTEMA DE MONITORAMENTO DA DESCARGA DA ENERGIA ELÉTRICA
RESIDUAL DE BATERIAS DE ÍON DE LÍTIO PARA SUA RECICLAGEM

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

2025

LARISSA ARAUJO PASSOS

SISTEMA DE MONITORAMENTO DA DESCARGA DA ENERGIA ELÉTRICA
RESIDUAL DE BATERIAS DE ÍON DE LÍTIO PARA SUA RECICLAGEM

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho” como requisito para obtenção
de título de Bacharel em Engenharia Eletrônica
e de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. José Augusto de Oliveira
Coorientadora: Dra. Mirian Paula dos Santos

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

2025

P289s	Passos, Larissa Araujo Sistema de monitoramento da descarga da energia elétrica residual de baterias de íon de lítio para sua reciclagem / Larissa Araujo Passos. -- São João da Boa Vista, 2025 35 p. : il., tabs., fotos Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Telecomunicações) - 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. Descargas elétricas. 3. Reaproveitamento. 4. Ciclo de vida do produto. 5. Química. I. Título.
-------	---

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**SISTEMA DE MONITORAMENTO DA DESCARGA DA ENERGIA ELÉTRICA
RESIDUAL DE BATERIAS DE ÍON DE LÍTIO PARA SUA RECICLAGEM**

Aluno: Larissa Araújo Passos

Orientador: Prof. Dr. José Augusto de Oliveira

Banca Examinadora:

- José Augusto de Oliveira (Orientador)
- Lana Sobral Vieira Escada Monteiro (Examinadora)
- Nathane Abrão Ribeiro (Examinadora)

Os formulários de avaliação e a ata da defesa, na qual consta a aprovação do trabalho, devidamente assinados pela banca encontram-se no prontuário eletrônico do aluno.

São João da Boa Vista, 04 de dezembro de 2025

RESUMO

O avanço tecnológico e a transição energética global impulsionaram o uso das baterias de íons de lítio (LIBs), que são amplamente empregadas em dispositivos eletrônicos e veículos elétricos devido à elevada densidade energética, longa vida útil e alta eficiência de recarga. Contudo, a dependência de metais críticos e os impactos ambientais decorrentes da extração, descarte inadequado e crescente geração de resíduos reforçam a necessidade de estratégias sustentáveis para seu reaproveitamento. Nesse contexto, a descarga elétrica residual das células surge como etapa fundamental para garantir segurança no manuseio e viabilizar processos eficientes de reciclagem. Este trabalho teve como objetivo desenvolver, implementar e avaliar um sistema automatizado de monitoramento e descarga elétrica residual de LIBs, utilizando soluções salinas contendo MnSO_4 e NaHCO_3 em diferentes concentrações. O processo experimental foi conduzido com uso de Arduino® e software Processing®, permitindo o registro contínuo da tensão das células durante os ensaios. Foram investigados parâmetros operacionais como agitação, recirculação e utilização de metal de sacrifício, bem como a atuação simultânea desses fatores sobre a eficiência e estabilidade da descarga. Os resultados evidenciaram que a combinação integrada dos parâmetros operacionais favoreceu curvas de descarga mais estáveis e rápidas, especialmente para soluções de MnSO_4 em concentrações adequadas. Embora o NaHCO_3 apresentasse maior uniformidade nas medições, não promoveu a descarga completa nas condições avaliadas. Também se observou influência significativa do tipo de célula: as NMC exibiram comportamento mais estável, enquanto as LCO demonstraram descarga mais rápida, e as células classificadas como “outras” apresentaram maior eficiência quando submetidas ao conjunto de parâmetros operacionais e à solução de MnSO_4 . A metodologia proposta demonstrou-se segura, reprodutível e potencialmente aplicável em escala laboratorial e industrial, contribuindo para o avanço de práticas sustentáveis de reciclagem e para o fechamento do ciclo de vida das LIBs. O estudo reforça a importância de integrar variáveis físico-químicas e operacionais para otimizar a neutralização da carga residual, assim, alinhando o processo aos princípios da economia circular e à mitigação dos impactos ambientais associados às baterias de íons de lítio.

Palavras - chave: baterias de íon lítio; descarga de energia residual; reciclagem; sustentabilidade; economia circular.

ABSTRACT

Technological advances and the global energy transition have driven the widespread use of lithium-ion batteries (LIBs), which are widely employed in electronic devices and electric vehicles due to their high energy density, long lifespan, and charging efficiency. However, the dependence on critical metals and the environmental impacts associated with extraction, improper disposal, and increasing waste generation highlight the need for sustainable strategies for their reuse. In this context, residual electrical discharge emerges as an essential step to ensure safe handling and to enable efficient recycling processes. This study aimed to develop, implement, and evaluate an automated system for monitoring and performing the residual electrical discharge of LIBs, using saline solutions containing MnSO_4 and NaHCO_3 at different concentrations. The experimental procedure was conducted using Arduino® hardware and Processing® software, enabling continuous voltage acquisition throughout the tests. Operational parameters such as agitation, recirculation, and the use of sacrificial metal, as well as their combined effects, were investigated regarding discharge efficiency and stability. The results showed that the integrated application of all operational parameters favored more stable and faster discharge curves, especially for MnSO_4 solutions at suitable concentrations. Although NaHCO_3 provided greater uniformity in the measurements, it did not achieve complete discharge under the evaluated conditions. Significant influence of cell type was also observed: NMC cells exhibited more stable behavior, LCO cells presented faster discharge, and cells classified as “others” showed greater efficiency when subjected to the full set of operational factors in MnSO_4 solution. The proposed methodology proved to be safe, reproducible, and potentially applicable at laboratory and industrial scales, contributing to sustainable recycling practices and supporting the closure of the LIB life cycle. The study reinforces the importance of integrating physicochemical and operational variables to optimize residual charge neutralization, thus, aligning the process with circular economy principles and the environmental impacts mitigation related to lithium-ion batteries.

Keywords: lithium-ion battery; residual electrical discharge; recycling; sustainability; circular economy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Funcionamento de uma LIB.	16
Figura 2 – Sistema de descarga.	25
Figura 3 – Análise de todos os fatores na solução de MnSO_4 na célula NMC.....	25
Figura 4 – Análise de todos os fatores na solução de MnSO_4 na célula NMC	26
Figura 5 – Análise de todos os fatores na solução de NaHCO_3 na célula NMC.	26
Figura 6 – Análise de todos os fatores na solução de NaHCO_3 na célula NMC.	27
Figura 7 – Análise de todos os fatores na solução de MnSO_4 na célula LCO.	28
Figura 8 – Análise de todos os fatores na solução de MnSO_4 na célula LCO.	28
Figura 9 – Análise de todos os fatores na solução de NaHCO_3 na célula LCO..	29
Figura 10 – Análise de todos os fatores na solução de NaHCO_3 na célula LCO.	29
Figura 11 – Análise de todos os fatores na solução de MnSO_4 na célula outras.	30
Figura 12 – Análise de todos os fatores na solução de MnSO_4 na célula outras.	31
Figura 13 – Análise de todos os fatores na solução de NaHCO_3 na célula outras.	31
Figura 14 – Análise de todos os fatores na solução de NaHCO_3 na célula outras.	32
Figura 15 – Baterias descarregadas antes da lavagem.....	35
Figura 16 – Baterias descarregadas depois da lavagem.....	36

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Experimentos realizados em laboratório	21
Quadro 2 – Conclusão da análise de dados para as NMC	33
Quadro 3 – Conclusão da análise de dados para as LCO	33
Quadro 4 – Conclusão da análise de dados para as Outras	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EoL: *End of Life*

LCO: Óxido de Lítio Cobalto (LiCoO_2)

LIB: *Lithium-Ion Battery* (Bateria de íon de lítio)

MMA: Ministério do Meio Ambiente

MSDS: *Material Safety Data Sheet* (Ficha de Dados de Segurança)

NCA: Óxido de lítio, níquel cobalto e alumínio (LiNiCoAlO_2)

NMC: Óxido de lítio, cobalto, níquel e manganês ($\text{LiNi}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{Co}_{0.33}\text{O}_2$)

ODS: Objetivos do Desenvolvimento Sustentável

ONU: Organização das Nações Unidas

PNRS: Política Nacional de Resíduos Sólidos

RBS: Revisão Bibliográfica Sistemática

SOC: Estado da Carga da Bateria

WEEE Directive: *Waste Electrical and Electronic Equipment Directive* (Diretiva de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	16
3. MATERIAIS E MÉTODOS	17
3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.2 PROCESSO EXPERIMENTAL.....	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	23
5. CONCLUSÃO	34
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

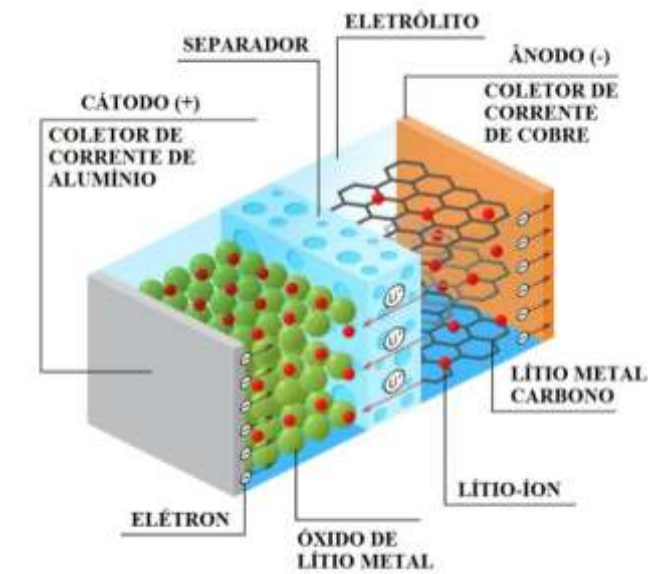
1. INTRODUÇÃO

As baterias de íons de lítio (do inglês, *lithium-ion batteries* – LIBs) são dispositivos eletroquímicos recarregáveis que armazenam e liberam energia por meio do movimento de íons de lítio entre dois eletrodos: o cátodo e o ânodo. Esses componentes são caracterizados por uma boa eficiência de carga e descarga, também possuem sua alta capacidade de armazenamento de energia, são leves e apresentam um longo período de vida útil. As LIBs apresentam menores impactos ambientais em comparação a tecnologias anteriores, consolidando-se como um marco no avanço das tecnologias de armazenamento de energia (FEM, 2019; Smith, 2020; Habib; Hansdóttir; Habib, 2020).

O cátodo é geralmente composto por óxidos metálicos, contendo lítio (Li), cobalto (Co), níquel (Ni), manganês (Mn), ferro (Fe), e alumínio (Al). Entre as formulações mais comuns estão o óxido de lítio e cobalto (LiCoO_2) LCO, o óxido de lítio e ferro (LiFePO_4) LFP, o óxido de lítio, níquel, manganês e cobalto ($\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{(1-x-y)}\text{O}_2$) NMC e o óxido de lítio e manganês (LiMn_2O_4) LMO (Liu *et al.*, 2020). A química NMC destaca-se pela combinação equilibrada entre capacidade, estabilidade e custo (Li *et al.*, 2021). O ânodo, por sua vez, é constituído de carbono grafitico, podendo incluir silício ou ligas à base de silício (FEM, 2019; Smith, 2020; Habib; Hansdóttir; Habib, 2020).

O eletrólito, líquido ou sólido, contém sais de lítio dissolvidos em solventes orgânicos, permitindo o transporte de íons entre os eletrodos. O separador, uma membrana porosa, impede o contato direto entre o cátodo e o ânodo, evitando curtos-circuitos. A eficiência e a segurança das LIBs dependem fortemente da qualidade dos materiais e da interação entre eles (Goodenough & Kim, 2022). A estrutura de uma LIB é representada abaixo (Figura 1).

Figura 1 — Funcionamento de uma LIB.



Fonte: STA Eletrônica.

O consumo das baterias de íon lítio tem se intensificado nas últimas décadas, isso se deve pelo grande aumento do uso de veículos elétricos e pela expansão das fontes de energia renováveis, cuja procura se intensificou devido às fortes alterações climáticas, entre outros fatores. Essas baterias são consideradas peças-chave na transição para uma economia de baixo carbono, contribuindo diretamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa (McKinsey, 2023).

O âmbito de aplicação das LIBs pode ser amplo, podendo incluir desde dispositivos eletrônicos até sistemas de armazenamento de energia. Contudo no setor de transportes, essas baterias desempenham um papel significativo, onde atuam fortemente para a transição de fontes de energia derivadas de combustíveis fósseis, para fontes de energia elétrica mais sustentáveis (Bradley *et al.*, 2017; FEM, 2019).

As aplicações incluem automóveis, aeronaves, dispositivos de telecomunicações, como antenas e dispositivos móveis, patinetes elétricos, entre outros. Isso reflete o papel das baterias de íon lítio, na descarbonização da indústria (Zhang *et al.*, 2013).

A demanda por LIBs vem aumentando continuamente nos últimos anos, em consequência disso a elevação na utilização de lítio também é notória. Segundo o BGR (Instituto Federal Alemão de Geociências e Recursos Naturais, do alemão *Bundesanstalt für*

Geowissenschaften und Rohstoffe) para 2030 é esperado uma demanda anual variando entre 316.000 e 558.000 toneladas de lítio metálico, enquanto em 2015 o consumo mundial superou 30.000 toneladas.

Esse crescimento reforça a importância de compreender o ciclo de vida das LIBs, desde a extração dos metais até o descarte e a reciclagem, visando mitigar os impactos ambientais e assegurar a disponibilidade de matérias-primas estratégicas.

Para a fabricação das LIBs, é necessário o uso de metais escassos, alguns dos quais provêm a partir de processos secundários da mineração de outros insumos, como o cobalto que pode ser extraído indiretamente da mineração de níquel ou cobre (Habib; Hansdóttir; Habib, 2020). Essa dependência acarreta riscos econômicos e geopolíticos, além de impactos ambientais significativos associados à extração e ao refino desses metais (BGR, 2019; Habib; Hansdóttir; Habib, 2020). Sendo assim, a recuperação eficiente desses materiais é essencial para reduzir a dependência da mineração e os impactos associados (Shaw-Stewart *et al.*, 2019).

Visando melhoria contínua e sustentável de indicadores de desempenhos econômicos e ambientais, é fundamental encerrar o ciclo de vida das LIBs. O reaproveitamento de matéria-prima através da reciclagem, alinha-se diretamente aos princípios da economia circular, reduz o descarte incorreto, e atende os ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável) propostos pela ONU.

No Brasil, essa logística reversa, está assistida por algumas legislações e diretrizes como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS – Brasil, 2011), o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2019) que também se alinham com premissas globais como *Waste Electrical and Electronic Equipment Directive* (WEEE Directive, 2024).

Diversas abordagens têm sido aplicadas para a reciclagem de LIBs. Entre as mais conhecidas estão os processos pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos e diretos:

- Os **pirometalúrgicos** utilizam altas temperaturas para fundir os componentes, recuperando metais como cobalto, níquel e cobre (Zhang *et al.*, 2013).
- Os **hidrometalúrgicos** empregam soluções químicas para dissolver e separar os metais, sendo mais eficientes e ambientalmente favoráveis (Zhang *et al.*, 2013).
- Os **processos diretos** buscam recuperar e reutilizar materiais ativos com o mínimo de modificação química, reduzindo custos e perdas energéticas (Zhang *et al.*, 2013).

Um dos tipos mais comuns de LIBs atualmente possui cátodo de óxido de lítio-cobalto

(LiCoO₂), chamadas de LCO, que se destaca pela sua alta densidade energética específica, sendo a escolha padrão para a maioria dos eletrônicos de consumo portáteis. E também a bateria de composição química de óxido de lítio, níquel, manganês e cobalto (LiNi_xMn_yCo_(1-x-y)O₂) conhecida como NMC, sobressai por oferecer um equilíbrio entre a densidade energética, potência e vida útil, o que a torna a química dominante em veículos elétricos (EVs) por exemplo, e aplicações que exigem alta capacidade e desempenho balanceado.

Antes do processo de reciclagem, é necessário realizar a descarga elétrica residual das baterias, garantindo a segurança durante o manuseio e prevenindo riscos de curto-circuito, explosão ou incêndio. Essa etapa é indispensável para qualquer tecnologia de reciclagem ambiental e economicamente sustentável, bem como para assegurar condições seguras de trabalho durante o desmonte e processamento das células (Shaw-Stewart *et al.* , 2019).

As técnicas mais empregadas para descarregar LIBs são os métodos elétricos e os métodos eletroquímicos.

- Nos métodos elétricos, a descarga ocorre por meio de resistores conectados às células, permitindo o controle da corrente e a medição de parâmetros como resistência interna e eficiência de descarga (Shaw-Stewart *et al.*, 2019)
- Já os métodos eletroquímicos envolvem a imersão das células em soluções condutoras contendo sais, como sódio (Na), potássio (K) ou amônio (NH₄), permitindo uma análise mais detalhada das reações e da estabilidade dos materiais durante o processo (Shaw-Stewart *et al.*, 2019).

Cada técnica apresenta vantagens específicas: os métodos elétricos se destacam pela simplicidade e controle, enquanto os eletroquímicos oferecem maior eficiência na neutralização da carga residual e na preservação dos componentes internos.

Diante do crescimento exponencial do uso das LIBs e de sua relevância para a transição energética global, torna-se indispensável compreender suas propriedades, estrutura, ciclo de vida e desafios associados à reciclagem. A motivação deste trabalho, portanto, consiste em estruturar e sistematizar um processo de descarga elétrica residual fundamentado em princípios de sustentabilidade ambiental, viabilidade econômica e segurança laboral, contribuindo para o fechamento do ciclo de vida das LIBs e para o avanço da economia circular.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho consistiu em avaliar a descarga da energia residual presente em LIBs em fim de vida, visando compreender os fatores que influenciam sua eficiência e estabelecer condições operacionais mais adequadas para sua aplicação em laboratório e, visando reprodutibilidade na indústria.

Para isso foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- i. Desenvolver e implementar um sistema de monitoramento contínuo da tensão, capaz de registrar continuamente, as variações da tensão ocorridas durante o processo de descarga, permitindo a análise das baterias em diferentes condições experimentais;
- ii. Avaliar a influência da agitação, da recirculação da utilização de um metal de sacrifício da solução sobre a eficiência do processo de descarga, analisando se a movimentação do meio contribui para a aceleração da descarga da energia residual da célula;
- iii. Avaliar a influência de todos os parâmetros anteriores em conjunto (agitação, recirculação e inserção de metal de sacrifício), para identificar seu impacto na descarga;
- iv. Por fim, analisar a influência da utilização de diferentes soluções salinas e alteração da concentração dessas soluções, para concluir qual delas apresenta maior viabilidade para aplicação no processo de descarga.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A primeira etapa do trabalho consistiu na realização de uma Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS), em que o processo experimental foi estudado e analisado por meio da leitura dos artigos científicos sobre o tema; e na segunda etapa foram realizados os processos experimentais.

Para a neutralização da carga residual existente as LIBs, as células foram submergidas em soluções compostas por MnSO_4 , e em NaHCO_3 com diferentes concentrações.

Os principais materiais utilizados foram:

- Arduíno;
- Protoboard;
- Recipiente para imersão das LIBs;
- Cabos compatíveis com o Arduino e protoboard;
- Metal de sacrifício;
- Computador para aquisição e análise dos dados;
- Agitador magnético com aquecimento; e
- Bomba para a recirculação da solução

A metodologia utilizada para executar o trabalho, bem como as etapas do processo experimental, estão descritas nos itens 3.1 e 3.2, em seguida.

3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Caracterizada por aplicar critérios rigorosos ao buscar e analisar estudos acadêmicos, a RBS tem como objetivo definir e esclarecer os conceitos fundamentais sobre um determinado tema, através de um método de análise crítica (Conforto; Amaral; Silva, 2011).

Seguindo o método RBS Roadmap (Conforto; Amaral; Silva, 2011), que integra alguns tipos de pesquisas científicas, como a revisão de literatura, o estudo de casos e a pesquisa de campo. Assim é possível proporcionar uma análise mais robusta e abrangente.

Para a elaboração desta pesquisa, o trabalho foi concentrado apenas na revisão da literatura voltada para a análise empírica da descarga de baterias de íon-lítio, com foco em suas possibilidades de reciclagem.

Na etapa inicial, foram definidos alguns termos que evidenciam o ambiente de pesquisa, através de uma seleção criteriosa de palavras-chave. Nesse processo foram definidas, e testadas diversas combinações de termos e operadores lógicos de busca, como “AND” e “OR”, de modo a garantir a diversidade e coerência dos resultados.

Considerando que a descarga da energia residual é uma etapa essencial pré-reciclagem, para evitar riscos durante a operação dessas células, a estratégia para definir as palavras-chave precisou demonstrar isso, portanto dois pontos principais foram considerados: o campo de pesquisa que foi estudado e os objetivos do trabalho.

- O ambiente de estudo corresponde à descarga da energia residual presente em baterias, enquanto os objetivos concentram-se em avaliar como o processo de descarga elétrica pode ter baixo custo de implantação e operacionalmente seguro. Como a descarga trata-se de uma etapa fundamental no processo de reciclagem das LIBs, pois pode mitigar os riscos associados às próximas etapas do processo (Shaw-Stewart *et al.*, 2019).

Segundo Conforto, Amaral e Silva (2011), para maximizar a qualidade dos resultados é necessário combinar as palavras-chave com os operadores lógicos citados anteriormente. As palavras-chave utilizadas foram:

1. Lithium-ion battery;
2. Recycling;
3. Battery recycling;
4. Residual energy;
5. End-of-life battery;
6. Electric discharge;
7. Waste treatment;
8. Systematic bibliographic review;
9. Waste management;
10. Environmental management;
11. End-of-life strategies;
12. Disposal of batteries.

Além disso, nessa etapa é importante definir uma base de dados como referência. A ScienceDirect foi selecionada como a base principal, por apresentar maior amplitude e

consistência nos dados, em comparação a Scopus, IEEE e Xplore, que também foram testadas.

Para obter resultados mais apurados, e selecionar os artigos, foram aplicados três filtros de pesquisa. O primeiro filtro foi a análise dos títulos, resumos e palavras-chave dos artigos obtidos inicialmente, pela combinação das palavras-chave e operadores lógicos. Em seguida, no segundo filtro, envolveu-se a leitura das introduções e conclusões dos trabalhos mantidos pelo filtro 1. Junto ao filtro 2, também houve a aplicação de critérios específicos de inclusão, como por exemplo o método de pesquisa, que deve ser empírico.

No último estágio, foi realizada a leitura dos estudos selecionados após o segundo filtro, essa etapa é fundamental para uma compreensão abrangente e aprofundada do conteúdo dos artigos, permitindo uma avaliação mais precisa de sua relevância e contribuição para a pesquisa em questão (Conforto; Amaral; Silva, 2011). Também analisados detalhadamente todos os aspectos dos artigos, incluindo metodologia, resultados, discussões e conclusões, a fim de garantir que apenas os artigos mais pertinentes e substanciais fossem incluídos na revisão bibliográfica sistemática .

3.2 PROCESSO EXPERIMENTAL

O processo experimental teve como objetivo principal avaliar a eficiência de diferentes técnicas e parâmetros aplicados à descarga elétrica residual de LIBs, considerando à sua futura reciclagem de forma segura e eficiente. Para tanto, foi desenvolvido um sistema de descarga especialmente projetado para esta finalidade, aliado a um conjunto de ensaios experimentais conduzidos em ambiente controlado de laboratório. Inicialmente, o sistema de descarga foi concebido a partir da modelagem de um suporte estrutural elaborado por manufatura aditiva (impressão 3D). O projeto foi desenvolvido em ambiente computacional, desde a elaboração do protótipo em software até a montagem física do dispositivo. Essa abordagem possibilitou a personalização dos componentes e o rápido ajuste dimensional para atender aos requisitos experimentais de segurança e estabilidade mecânica.

Posteriormente, foram selecionadas as células de baterias utilizadas nos testes, todas apresentando tensão superior a 3,0 V, medidas com um multímetro antes de serem imersas na solução. Em seguida, os sais condutores empregados nas soluções salinas também foram definidos com base na RBS. As soluções foram preparadas em diferentes concentrações, de

modo a permitir a análise da influência da condutividade iônica e da composição química sobre o processo de descarga.

Os ensaios experimentais foram conduzidos em 10 dias, em ciclos de 8 horas de duração, sob condições controladas, e variaram conforme os parâmetros de interesse definidos. Cada ciclo envolveu a descarga da energia residual das LIBs sob diferentes combinações de fatores experimentais, incluindo a inserção de um metal de sacrifício, a presença de agitação mecânica e a recirculação da solução, bem como a combinação simultânea de todos esses fatores, como é mostrado no quadro 1, abaixo.

Quadro 1 — Experimentos realizados em laboratório.

Dia	Agitação	Recirculação	Metal de Sacrifício	Todos os fatores em conjunto	Solução	Concentração (mol/L)
1	NMC/Outras/L CO		NMC/Outras/L CO		NaHCO ₃	1,0
2		NMC/Outras/L CO			NaHCO ₃	1,0
3				NMC/Outras/L CO	NaHCO ₃	1,0
4	NMC/Outras/L CO		NMC/Outras/L CO		NaHCO ₃	1,5
5		NMC/Outras/L CO			NaHCO ₃	1,5
6				NMC/Outras/L CO	NaHCO ₃	1,5
7	NMC/Outras/L CO	NMC/Outras/L CO	NMC/Outras/L CO		MnSO ₄	0,5
8				NMC/Outras/L CO	MnSO ₄	0,5
9	NMC/Outras/L CO	NMC/Outras/L CO	NMC/Outras/L CO		MnSO ₄	0,25
10				NMC/Outras/L CO	MnSO ₄	0,25

Fonte: Elaborado pelo autor.

As atividades realizadas durante o processo experimental, foram divididas em sete etapas:

I. Avaliação da variação dos sais nas soluções

Para esta primeira etapa do trabalho, baseado em estudos previamente publicados foram escolhidos os seguintes sais para preparação das soluções de

descarga: MnSO_4 e NaHCO_3 .

II. Avaliação da influência da concentração da solução salina.

Nesta etapa, analisou-se o efeito da variação da concentração do sal sobre a eficiência da descarga elétrica. Inicialmente, foram preparadas soluções com dois valores de concentração, sendo 0,25 mol/L para MnSO_4 e 1 mol/L para NaHCO_3 , em seguida foram aumentadas as concentrações, para avaliação do impacto desse fator no processo de descarga.

III. Avaliação da influência da agitação

Foram realizados testes com agitação magnética da solução, com o intuito de verificar a influência da movimentação do fluido na uniformidade do processo de descarga.

IV. Avaliação da influência da inserção de um metal de sacrifício

Investigou-se a utilização de um metal de sacrifício inserido no meio reacional, de modo a observar seu impacto na redução da corrosão dos terminais das células em estudo.

V. Avaliação da influência da recirculação

Foram avaliados os impactos da recirculação da solução, através de uma bomba de recirculação, no processo de descarga das células.

VI. Avaliação da influência de todos os fatores atuando em conjunto

Finalizando a análise dos parâmetros de influência, foi avaliada a queda de tensão das LIBs, quando todos os fatores citados anteriormente (agitação, recirculação e metal de sacrifício) atuavam em conjunto.

VII. Estudo da remoção dos resíduos da bateria pós-descarga

Após a descarga completa, procedeu-se à remoção dos resíduos resultantes do processo. Essa análise permitiu avaliar a integridade dos componentes contribuindo para a etapa posterior de reciclagem e revalorização das LIBs.

Tratamento dos dados adquiridos por meio do sistema de monitoramento:

Os dados de tensão coletados durante os ensaios, foram registrados continuamente por um sistema de monitoramento conectado ao circuito de descarga. Posteriormente, esses dados

foram tratados e analisados via Excel, verificando os valores medidos para cada hora do experimento, com o intuito de identificar a eficiência do processo.

Desta maneira, a metodologia proposta, ao integrar variáveis físico-químicas e operacionais, possibilitou uma análise sistemática dos fatores que influenciam a descarga elétrica residual das LIBs. O uso de manufatura aditiva no desenvolvimento do suporte experimental e a adoção de um sistema de monitoramento contínuo garantiram precisão, reprodutibilidade e segurança ao processo. Os resultados obtidos a partir dessas etapas servirão de base para a avaliação da eficiência e sustentabilidade do método proposto, contribuindo para o avanço das técnicas de reciclagem de baterias de íons de lítio.

O Arduino® foi utilizado em conjunto com o software Processing® para o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados que possibilitou o registro contínuo da tensão do sistema de descarga (Figura 2).

Figura 2 — Sistema de descarga



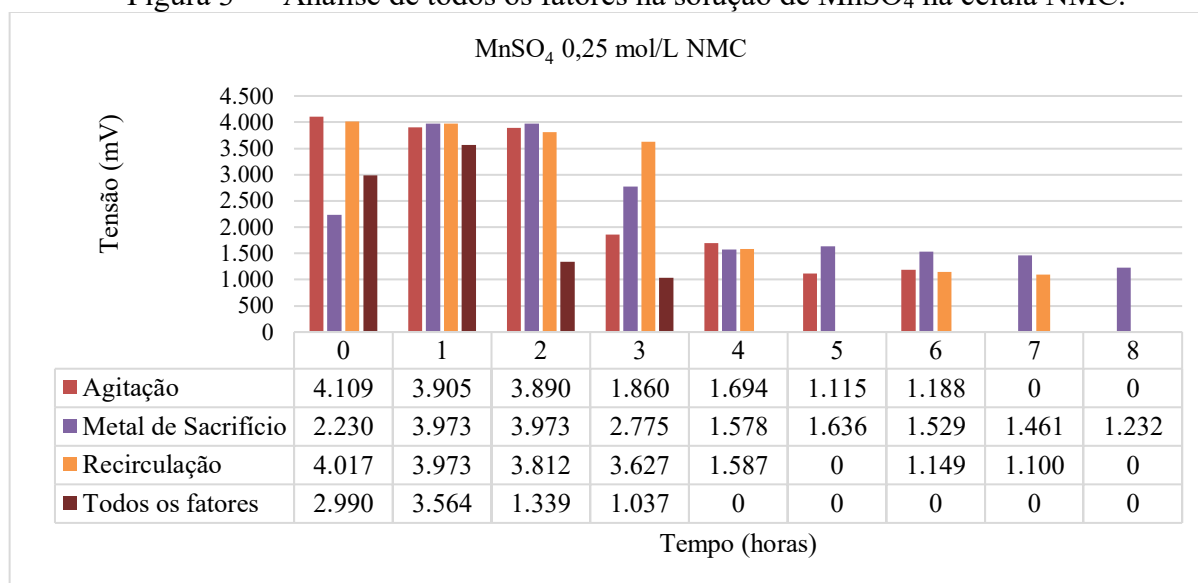
Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram utilizadas neste estudo, soluções de $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, e NaHCO_3 , cada uma em duas diferentes concentrações.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

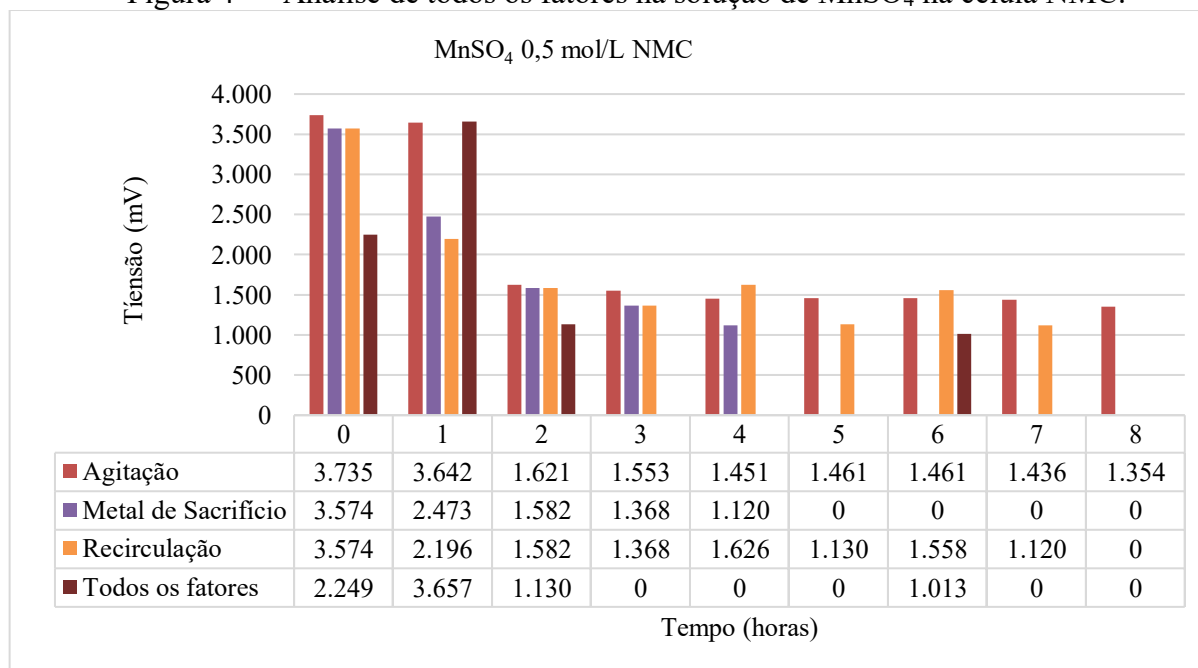
Os resultados do trabalho podem ser vistos nos gráficos das figuras 3 até 14 apresentados na sequência.

Figura 3 — Análise de todos os fatores na solução de MnSO_4 na célula NMC.

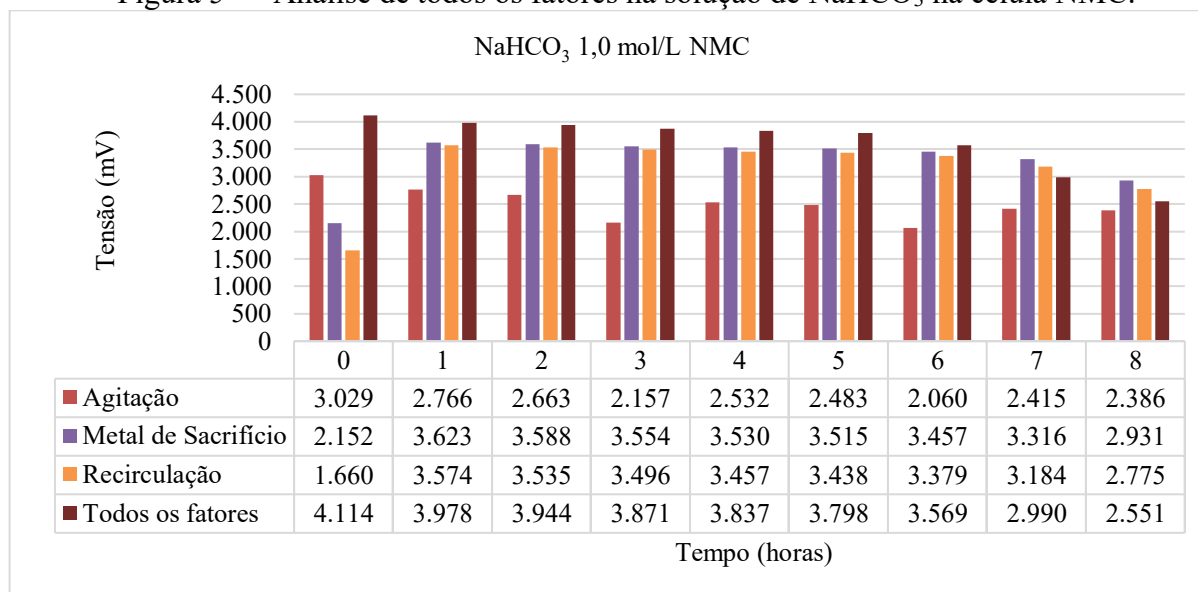


Fonte: Elaborado pelo autor.

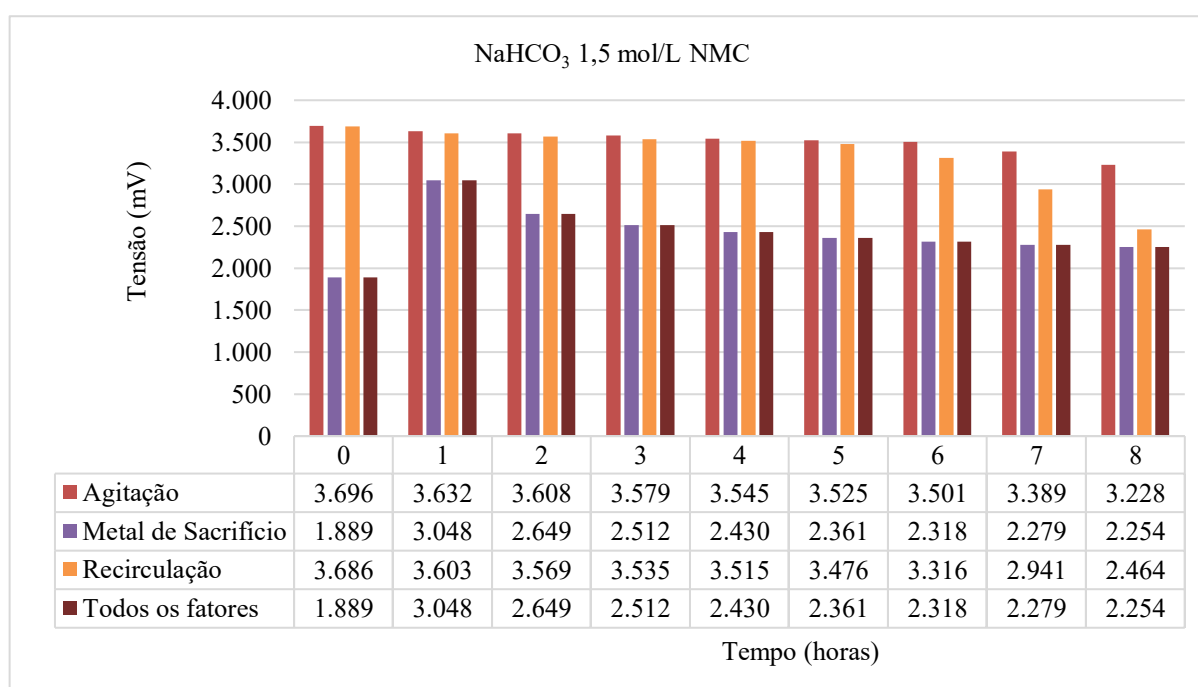
Figura 4 — Análise de todos os fatores na solução de MnSO_4 na célula NMC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5 — Análise de todos os fatores na solução de NaHCO_3 na célula NMC.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6 — Análise de todos os fatores na solução de NaHCO_3 na célula outras NMC.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as células do tipo NMC, foram avaliados todos os parâmetros operacionais, nas duas soluções para as diferentes concentrações, e pode-se entender queo conjunto que apresentou os

melhores resultados foi quando todos os fatores operacionais atuaram em conjunto na solução de MnSO_4 , com concentração de 0,25 mol/L, pois não apresentou inconsistências nos valores medidos e apresentou uma descarga completa a partir da quarta hora.

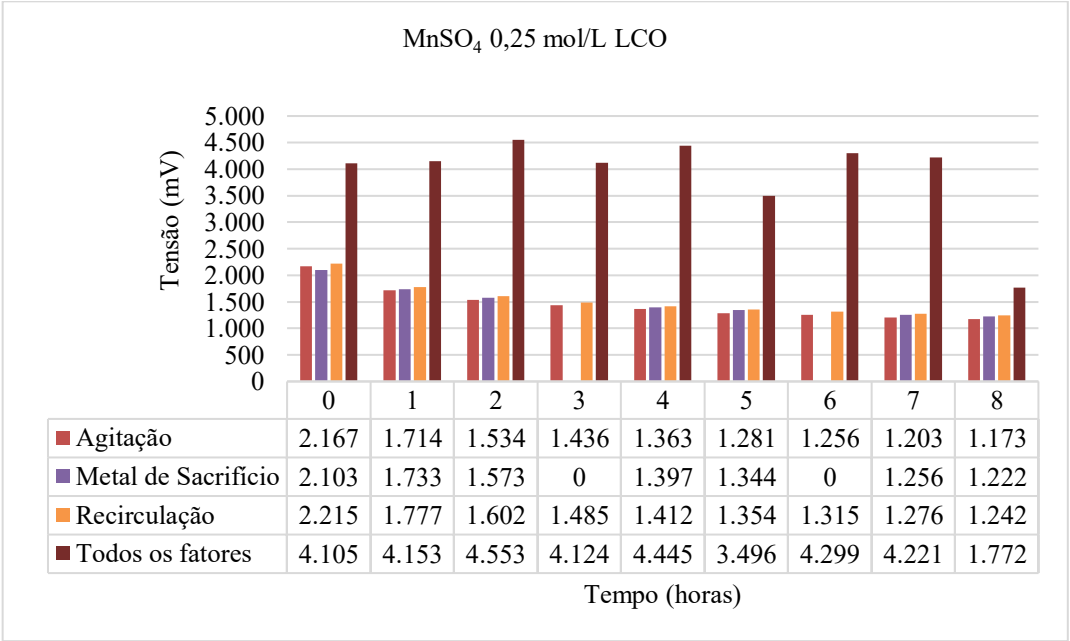
Analisando o parâmetro de agitação, apresentou uma descarga completa apenas quando foi utilizada a solução de MnSO_4 na concentração de 0,25 molar.

Enquanto para o parâmetro de inserção do metal de sacrifício, as melhores condições para a descarga completa foram com a solução de MnSO_4 na concentração de 0,5 molar.

E por fim, para a recirculação, ambas as concentrações de 0,25 e 0,5 molar para a solução de MnSO_4 apresentaram descarga completa, porém a concentração de 0,5 molar apresentou uma descarga mais uniforme, então é possível considerar essas condições como ideais para esse tipo de célula no parâmetro de recirculação.

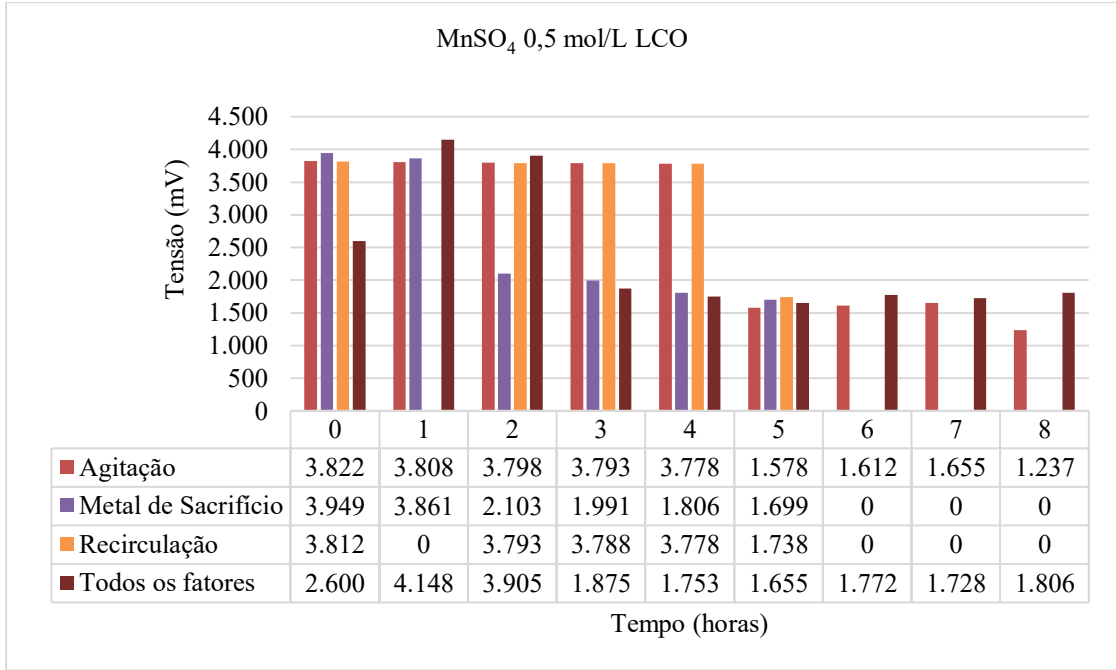
Neste tipo de célula, a solução que utilizou bicarbonato de sódio, não apresentou bons resultados, tendo em vista que as células não foram completamente descarregadas, nem apresentaram valores de tensão menores que 1,5 V após o final do processo.

Figura 7 — Análise de todos os fatores na solução de MnSO_4 na célula LCO.



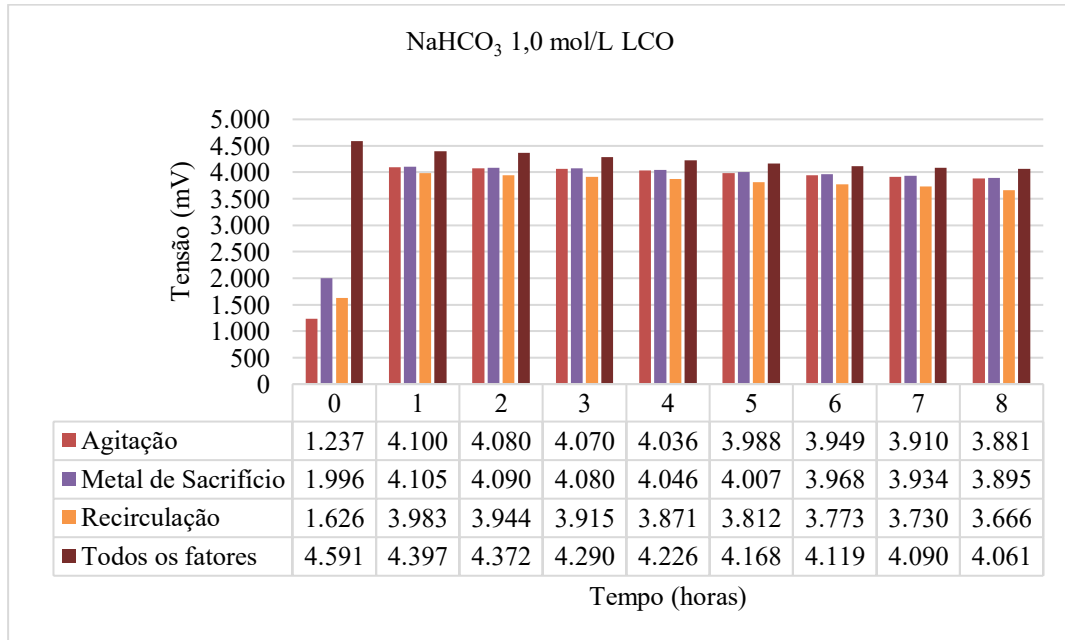
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 8 — Análise de todos os fatores na solução de MnSO_4 na célula LCO.



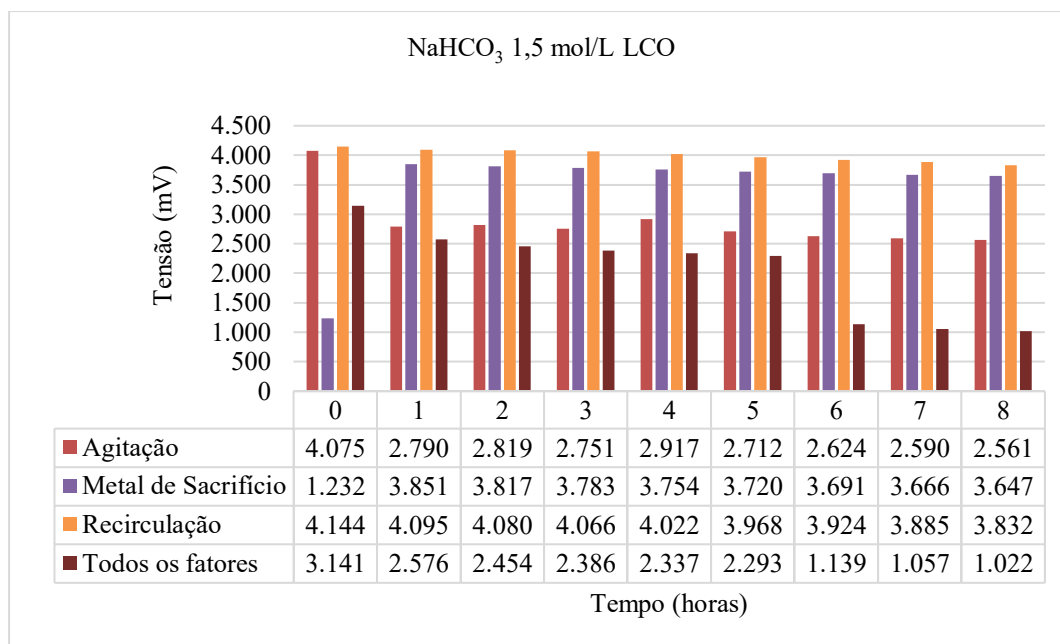
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9 — Análise de todos os fatores na solução de NaHCO₃ na célula LCO



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 10 — Análise de todos os fatores na solução de NaHCO₃ na célula LCO.



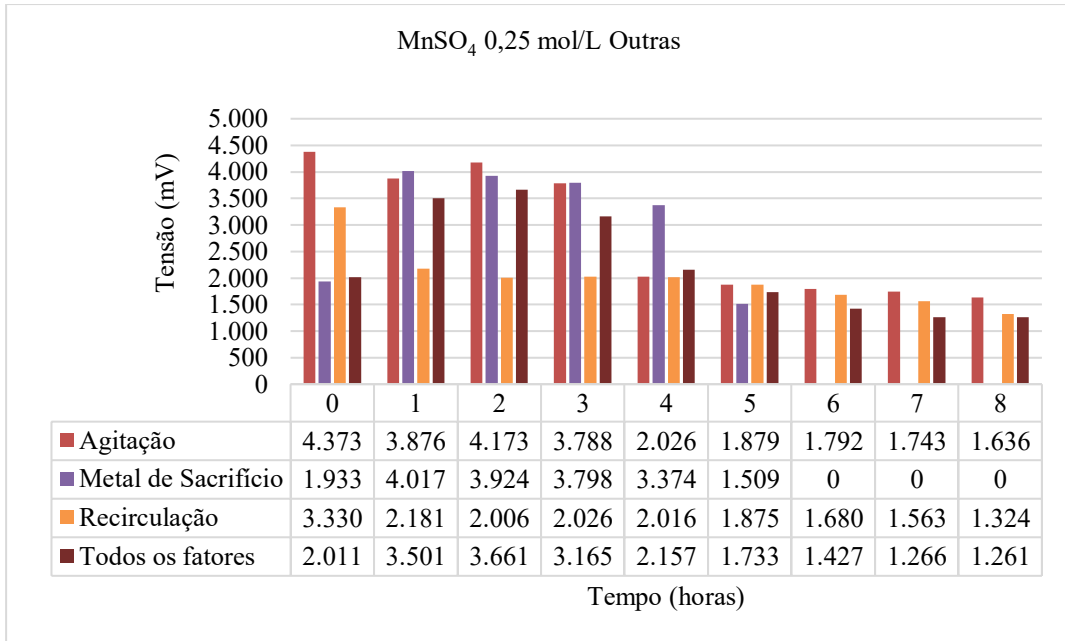
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na análise do comportamento das células do tipo LCO o processo de descarga, foram avaliados todos os parâmetros para as células LCO, nas duas soluções para as quatro concentrações, e pode-se entender que o conjunto que apresentou os melhores resultados foi todos os fatores em conjunto para a solução de MnSO_4 na concentração de 0,5 mol/L, para o metal de sacrifício e recirculação, ambos os parâmetros efetuaram a descarga completa a partir da sexta hora do processo. Mesmo com a solução composta por NaHCO_3 , na concentração de 1,5 mol/L, não ter descarregado totalmente a célula, esse conjunto obteve um desempenho aceitável dentro das 8 horas do processo, ou seja, com tensão < 1,5 V.

Para os parâmetros de agitação e todos os fatores atuando em conjunto, para nenhuma das soluções a descarga foi completa após o final do processo, porém finalizaram o ciclo do experimento com tensão inferior a 1,5 V.

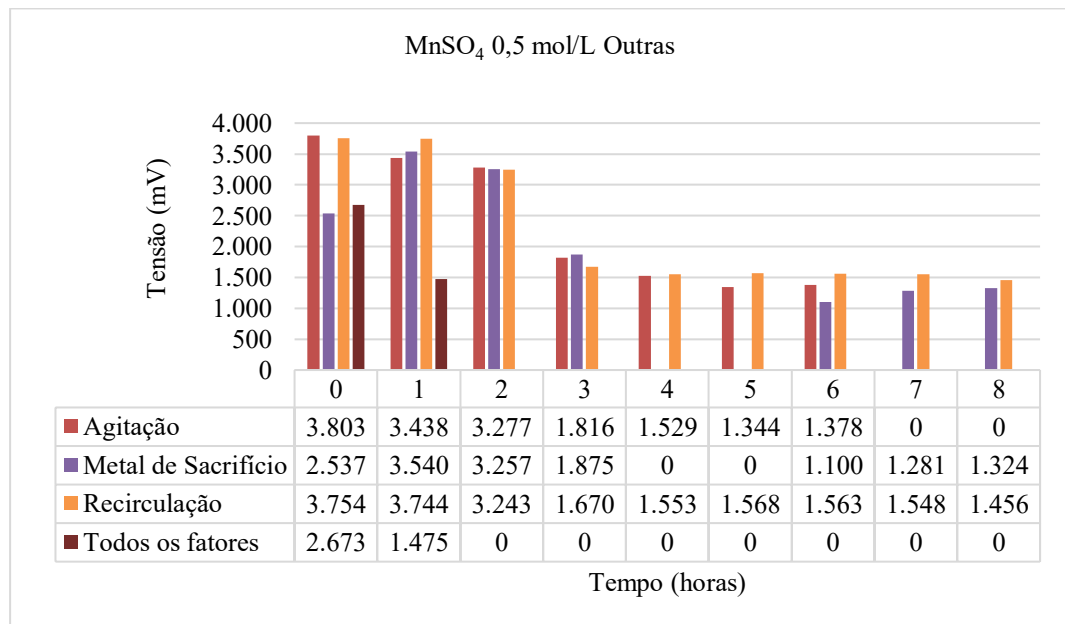
As melhores condições para a agitação foram com a solução de MnSO_4 na concentração de 0,5 mol/L e para todos os fatores em conjunto, foram com a solução composta por NaHCO_3 , na concentração de 1,5 mol/L, obtendo as respectivas tensões finais de 1,237 V e 1,022 V.

Figura 11 — Análise de todos os fatores na solução de MnSO_4 na célula outras.



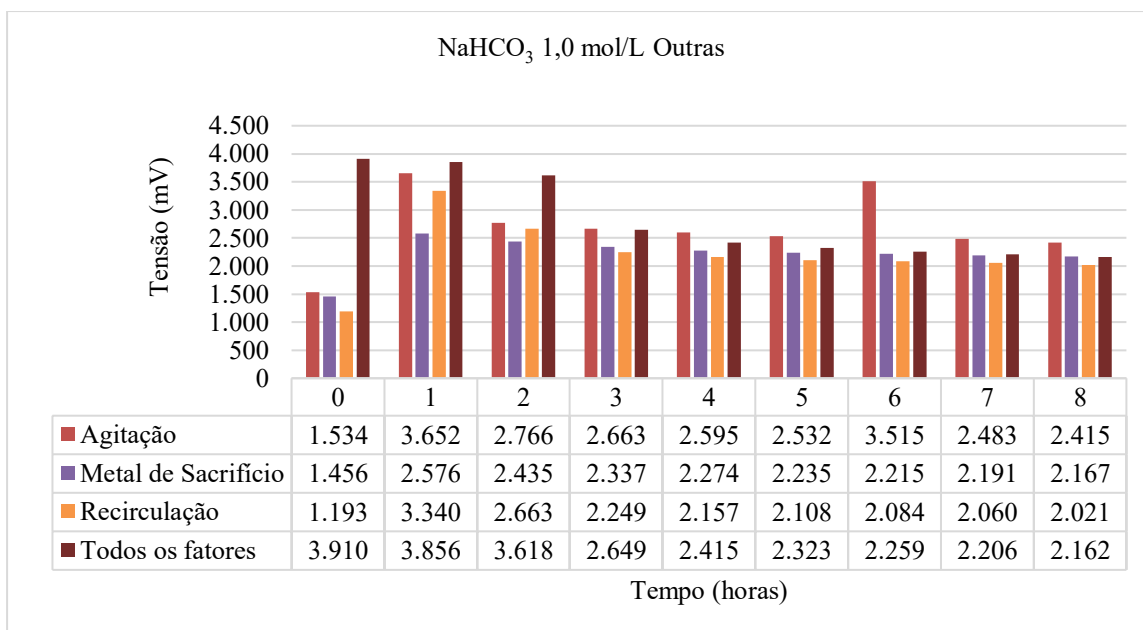
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 12 — Análise de todos os fatores na solução de MnSO₄ na célula outras.



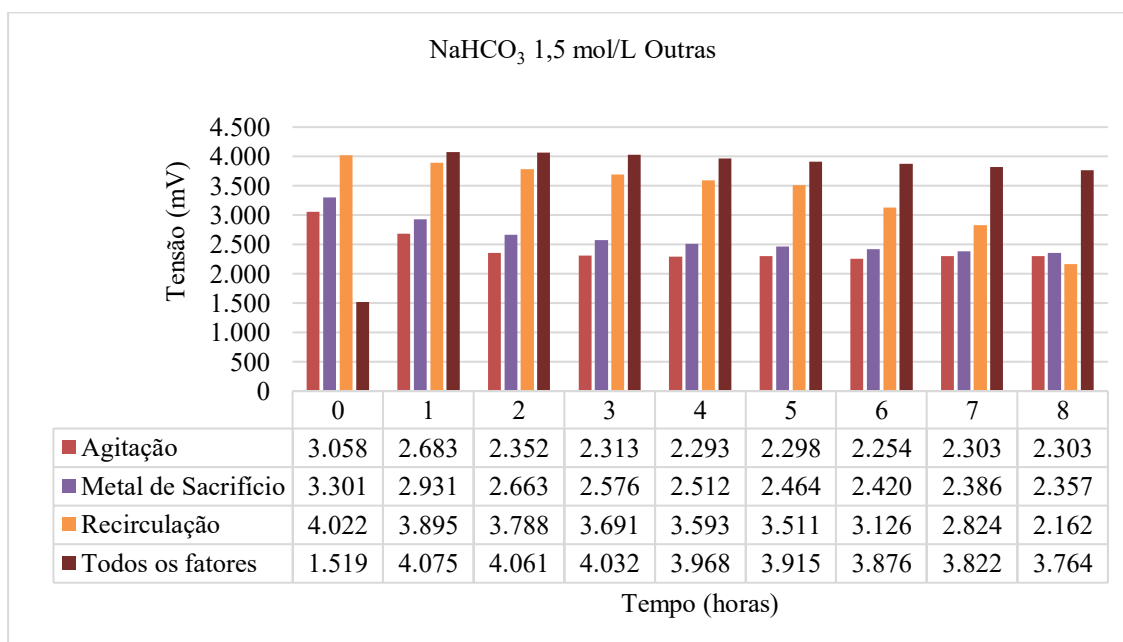
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 — Análise de todos os fatores na solução de NaHCO₃ na célula outras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 14 — Análise de todos os fatores na solução de NaHCO_3 na célula outras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, na última etapa da análise, avaliamos o desempenho das células do tipo outras, para as mesmas circunstâncias citadas anteriormente, e observou-se que para essas combinações, o melhor desempenho considerando a descarga total no menor tempo, foi para todos os fatores em conjunto para a solução de MnSO_4 na concentração de 0,5 mol/L.

No parâmetro de agitação o melhor desempenho também foi com a solução de MnSO_4 na concentração de 0,5 mol/L, quando a descarga completa foi realizada a partir da sétima hora de experimento.

Enquanto para o parâmetro de inserção do metal de sacrifício, a condição ideal foi utilizando também a solução de MnSO_4 , porém na concentração de 0,25 mol/L.

Já para o parâmetro de recirculação, a descarga completa não foi realizada, mas o valor de tensão obtido ao final do processo de descarga para a solução de MnSO_4 , na concentração de 0,25 molar, foi de 1,324 V, que é aceitável, visando a segurança no manuseio das células, onde a tensão deve ser a menor possível para completar o processo de reciclagem sem preocupações, como por exemplo a proteção da célula de perfurações.

Durante o processo de descarga das LIBs, observou-se uma tendência geral de queda progressiva da tensão em função do tempo, como esperado.

De forma geral, verificou-se que a velocidade de descarga (queda da tensão ao longo do tempo) dependeu significativamente da composição da solução (sal e concentração do sal) e das condições de agitação, recirculação, metal de sacrifício e todos os fatores atuando em conjunto.

É possível observar que em alguns momentos do processo de descarga em diferentes soluções, os valores registrados pelo sistema são iguais a zero, isso ocorreu pois os fios condutores apresentaram instabilidade durante a realização dos experimentos, fazendo com que a leitura não fosse feita corretamente em determinados instantes. Também se verificou que a solução $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ após a descarga, deixou resíduos nas células, que posteriormente foram analisados concluindo que não houve danos às baterias após o processo de descarga.

Analisando todos os gráficos em conjunto, é possível elaborar uma análise dividida em quatro partes, influência do tipo de solução salina, efeito da concentração molar, influência dos parâmetros operacionais, comparativo entre o tipo de células.

Entre as duas soluções salinas de $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, NaHCO_3 , observaram-se alguns comportamentos distintos, relacionados à eficiência da descarga. A solução de $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, apresentou desempenho satisfatório, embora com menor uniformidade nos valores de tensão durante a descarga. Embora o NaHCO_3 tenha demonstrado maior uniformidade ao longo do processo, ele não se mostrou suficientemente eficaz para promover a descarga completa das células. Apesar de manter valores de tensão estáveis durante as 8 horas de descarga, sem apresentar flutuações significativas, as células submetidas a essa solução ainda permaneceram parcialmente carregadas ao final do procedimento.

Quanto aos parâmetros operacionais, estes evidenciaram diferenças significativas no comportamento da curva de descarga, assim, uma breve comparação foi feita.

Em relação à concentração, embora a solução de $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ tenha sido identificada como a mais eficiente as descargas realizadas com concentração de 0,25 mol/L apresentaram desempenho superior. Nessa condição, verificou-se maior estabilidade do sistema, característica menos provável de ser obtida em soluções mais concentradas.

Quando aplicada isoladamente, a agitação promoveu uma melhora na uniformidade do processo de descarga, contribuindo para a redução de variações na tensão das células em descarga (Figura 12). A recirculação, por sua vez, apresentou um efeito significativo, garantindo que a solução permanecesse bem misturada, resultando em uma maior estabilidade dos valores de tensão ao longo da descarga (Figura 11).

A utilização de um metal de sacrifício também demonstrou impacto relevante, acelerando o processo de descarga, possivelmente em função de reações secundárias favoráveis que ocorreram durante o processo. Entretanto, observou-se que, em determinadas condições, a presença desse metal ocasionou flutuações nos valores medidos (Figura 9), sugerindo a necessidade de controle mais rigoroso dos medidores de tensão em um intervalo de tempo menor, mas não descartando a possibilidade de uma instabilidade do próprio sistema de medição.

Por fim, a aplicação simultânea de todos os parâmetros (agitação, recirculação e inserção do metal de sacrifício) apresentou o desempenho mais eficiente entre todos os ensaios realizados. Essa combinação resultou em curvas de tensão mais estáveis e em uma redução significativa do tempo necessário para a descarga completa (Figuras 3 e 4), indicando que os parâmetros de influência, apresentam melhor desempenho quando aplicados em conjunto.

As células NMC apresentam um comportamento de descarga contínuo e estável, sem oscilações abruptas entre as medições periódicas. Isso significa que seguem uma trajetória de queda progressiva. Essa estabilidade indica um processo de descarga mais controlado e previsível, o que reforça a eficiência e a confiabilidade desse tipo de célula durante o período de 8 horas analisado. Já as LCOs apresentam uma queda mais rápida sugerindo maior sensibilidade ao meio eletrolítico e, portanto, maior eficiência de descarga. As outras células apresentaram um bom desempenho, considerando todos os fatores em conjunto para a solução de MnSO_4 mais concentrada, considerando que na segunda hora do processo a célula já estava descarregada.

A análise final pode ser resumida no Quadro 2, abaixo.

Quadro 2 — Conclusão da análise de dados para as NMC.

Fator	Condição observada
Solução salina	MnSO ₄
Concentração	0,25 mol/L
Parâmetro de influencia	Todos em conjunto (agitação + recirculação + metal de sacrificio)
Tipo de célula	NMC

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 3 — Conclusão da análise de dados para as LCO.

Fator	Condição observada
Solução salina	MnSO ₄
Concentração	0,5 mol/L
Parâmetro de influencia	Metal de sacrificio
Tipo de célula	LCO

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 4 — Conclusão da análise de dados para as outras.

Fator	Condição observada
Solução salina	MnSO ₄
Concentração	0,5 mol/L
Parâmetro de influencia	Todos em conjunto (agitação + recirculação + metal de sacrificio)
Tipo de célula	Outras

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após o processo de descarga, as baterias foram retiradas das soluções e foram enxaguadas com água, como pode ser visto na Figura 12, e se mantiveram em processo de secagem durante semanas.

Após alguns dias do enxágue, observou-se que as células aparentavam estar corroídas (Figura 15). Entretanto, após serem lavadas com água e sabão, verificou-se que grande parte

do material identificado tratava-se apenas de resíduos deixados pela solução, sendo removidos sem causar danos à célula.

Figura 15 — Baterias descarregadas antes da lavagem



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 — Baterias descarregadas depois da lavagem



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como é possível observar na Figura 16, mesmo após o processo de descarga não foi identificada corrosão nas células, mas apenas sinais superficiais de oxidação. Esse comportamento indica que o procedimento adotado não compromete a estrutura das baterias, mantendo-as aptas para as próximas etapas do processo de reciclagem das LIBs e reforçando a eficácia da metodologia utilizada.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho cumpriu seu objetivo principal ao desenvolver e validar um sistema de descarga elétrica residual para LIBs, apresentando uma alternativa economicamente viável e operacionalmente segura para a etapa de pré-tratamento na reciclagem. A metodologia empregada permitiu uma análise dos fatores operacionais, validando a descarga em meio salino.

Com base nos resultados obtidos, constatou-se que o comportamento de descarga das LIBs é fortemente dependente da composição das soluções utilizadas, da concentração molar e dos parâmetros operacionais empregados durante o processo. Entre as soluções salinas analisadas, o MnSO_4 apresentou comportamento satisfatório, enquanto NaHCO_3 revelou limitações quanto à eficiência do sistema.

Em relação à concentração molar, observou-se que as soluções mais concentradas, favoreceram o processo de descarga. Para os parâmetros operacionais, a combinação simultânea de todos os parâmetros resultou nas melhores curvas de descarga, evidenciando maior eficiência e menor tempo para neutralização completa da carga residual.

De maneira geral, constatou-se que o processo é favorecido quando ocorre a ação conjunta da agitação, da recirculação da solução e da inserção de um metal de sacrifício em uma solução salina de MnSO_4 com concentração de 0,5 mol/L. Essas condições proporcionaram curvas de descarga mais rápidas e eficientes, ou seja, que obtiveram tensão igual a 0V, no final da descarga.

Do ponto de vista ambiental e social, a proposta contribui significativamente para o fechamento do ciclo de vida das LIBs, alinhando-se aos princípios da economia circular e aos ODS da ONU. A abordagem apresentada oferece uma alternativa segura e potencialmente sustentável para a redução da carga residual das baterias, reduzindo os riscos de acidentes e possibilitando a recuperação de materiais valiosos de forma mais eficiente.

Por fim, recomenda-se a continuidade desta pesquisa, com a ampliação dos testes em diferentes tipos de células e soluções condutoras. Estes avanços poderão consolidar o método como uma solução prática e segura para a reciclagem de LIBs.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AN, K. *Battery electric bus infrastructure planning under demand uncertainty*. Transportation Research Part C, v. 111, p. 572–587, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.01.009>

ARANDA, M. H.; JUNG, C. F.; SCHWENGBER TEN CATEN, C. *Determinação dos parâmetros operacionais de uma inovação tecnológica através da utilização do Design of Experiments – DOE*. Revista Liberato, v. 8, n. 9, p. 09–16, 2013. Disponível em: <https://revista.liberato.com.br/revista/article/view/104>. Acesso em: 4 dez. 2025.

BGR – BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE. *Lithium – Umfassende Informationen zur Ressource zur Versorgungssituation und zur Nachfrage*. Hannover: BGR, 2019. Disponível em: <https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Rohstoffe/Downloads/Lithium.pdf>.

BRADLEY, D. C. et al. Lithium. In: SCHULZ, K. J. et al. (ed.). *Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply*. U.S. Geological Survey Professional Paper 1802, p. K1–K21, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3133/pp1802K>.

BRASIL. *Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos*. Diário Oficial da União, Brasília, 2011.

CASTRO, F. D. et al. *Life cycle assessment of an innovative lithium-ion battery recycling route: A feasibility study*. Journal of Cleaner Production, v. 368, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133130>.

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. Anais [...]. Porto Alegre: UFRGS, 2011.

FÓRUM ECONÔMICO MUNDIAL (FEM). Global Battery Alliance. *A vision for a sustainable battery value chain in 2030: Unlocking the full potential to power sustainable development and*

climate change mitigation, 2019.

GOODENOUGH, J. B.; KIM, Y. *Challenges for rechargeable Li batteries*. *Journal of Power Sources*, v. 196, n. 16, p. 6688–6694, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.11.074>.

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, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104603>.

LI, M.; LU, J.; CHEN, Z.; AMINE, K. *30 years of lithium-ion batteries*. *Advanced Materials*, v. 33, n. 8, p. 2000781, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201800561>.

LIU, X.; ZHANG, J.; WANG, Y. *Recent advances in Li-ion batteries: Cathode materials and future prospects*. *Energy Storage Materials*, v. 27, p. 139–151, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2020.01.013>.

McKINSEY & COMPANY. *Battery 2030: Reshaping the future of energy storage*. *McKinsey Sustainability Report*, 2023. Disponível em: <https://www.mckinsey.com>.

SHAW-STEWART, J. R. et al. *Aqueous solution discharge of cylindrical lithium-ion cells*. *Journal of Energy Storage*, v. 23, p. 138–146, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00110>.

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 & Natural Resources Law*, v. 38, n. 1, p. 1–4, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/02646811.2020.1706821>.

STA ELETRÔNICA. *Como funciona uma bateria de lítio-ion*. [S.l.], [s.d.]. Disponível em: <https://www.sta-eletronica.com.br/artigos/baterias-recarregaveis/baterias-de-litio/como-funciona-uma-bateria-de-litio-ion>. Acesso em: 4 dez. 2025.

WASTE Electrical and Electronic Equipment Directive. Paris: IEA, [s.d.]. Disponível em: <https://www.iea.org/policies/25162-waste-electrical-and-electronic-equipment-directive>.

Acesso em: 4 dez. 2025.

ZHANG, T. et al. *Characteristics of wet and dry crushing methods in the recycling process of spent lithium-ion batteries*. *Journal of Power Sources*, v. 240, p. 766–771, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.05.009>.