

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

MARIA EDUARDA CARVALHO TOLEDO ANDRADE

ESTUDO DE PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NA DESCARGA DA ENERGIA  
RESIDUAL DE BATERIAS DE ÍON DE LÍTIO DO TIPO NMC

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

2024

MARIA EDUARDA CARVALHO TOLEDO ANDRADE

ESTUDO DE PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NA DESCARGA DA ENERGIA  
RESIDUAL DE BATERIAS DE ÍON DE LÍTIO DO TIPO NMC

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

**This work is licensed under the Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional License.**

**To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.**

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

2024

A553e

Andrade, Maria Eduarda Carvalho Toledo

Estudos de Parâmetros que influenciam no monitoramento da descarga de bateria íon  
lítio do tipo NMC / Maria Eduarda Carvalho Toledo Andrade. -- São João da Boa Vista,  
2024

47 p. : 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**

**ESTUDO DE PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NO MONITORAMENTO DA DESCARGA  
DA ENERGIA RESIDUAL DE BATERIAS DE ÍON DE LÍTIO DO TIPO NMC**

Aluno: Maria Eduarda Carvalho Toledo Andrade  
Orientador: Prof. Dr. José Augusto de Oliveira

Banca Examinadora:

- José Augusto de Oliveira (Orientador)
- Lana Sobral Vieira Escada Monteiro (Examinadora)
- Carla Rafaelli Martins (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 novembro de 2024

## RESUMO

O uso de baterias de íon lítio, (LIB do inglês *lithium-ion battery*) apresenta um crescimento exponencial na atualidade, sendo um tipo de bateria versátil e leve, com alta densidade e capacidade energética e elevada velocidade de recarga, além de apresentar menores potenciais de impactos ambientais, ganhando notoriedade em vários setores tecnológicos e econômicos. Vastamente utilizadas em eletrônicos e fontes estacionárias de energias, as baterias são consideradas um dos principais meios para a mudança da matriz energética fóssil para a elétrica no setor de transportes. Em detrimento, relacionadas a utilização das vantagens das LIBs, o consumo de lítio (Li) e de metais que compõem a bateria como cobalto (Co), níquel (Ni), manganês (Mn), cobre (Cu) e alumínio (Al) aumentou significativamente, chamando a atenção de vários setores produtivos. No decorrer da vida útil, as baterias que destinadas para a reciclagem podem ter sido submetidas a excessos mecânicos, elétricos ou térmicos. E a sua carga residual pode causar danos e impactos durante o processo de fim de vida. Neste contexto, a descarga da energia residual das LIBs é um processo importante para minimizar impactos ambientais e escalonar a reciclagem de LIBs dentro da indústria. O objetivo deste trabalho foi desenvolver e testar um sistema que prioriza a melhoria do desempenho ambiental na descarga da energia residual de baterias de íon-lítio do tipo Níquel-mangânes-cobalto (NMC). O sistema inclui o monitoramento da variação da tensão durante o processo de descarga, utilizando uma solução salina de baixo impacto ambiental como condutora entre cátodo e ânodo. Utilizando o método de Revisão Bibliográfica Sistemática foi possível caracterizar os estudos teóricos sobre processos de descarga da energia residual das LIBs. Em seguida, foram realizados 14 testes de descarga elétrica utilizando as soluções de sulfato de magnésio ( $\text{MgSO}_4$ ) e sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) em diferentes concentrações. Além disso, foram avaliadas as interferências de três parâmetros, agitação da solução, recirculação da solução e a inserção de um metal de sacrifício para minimizar a corrosão dos terminais das células. O melhor resultado, referente, a menor tensão residual obtida após os experimentos, foi alcançado utilizando  $\text{MgSO}_4$  em concentração de 1,0 mol/L e recirculação. O monitoramento das células durante todo o experimento revelou que, mesmo com pequenos danos físicos o sistema funcionou de forma contínua e precisa ao longo de todos os experimentos. A literatura existente sobre o tema apresenta uma lacuna significativa, destacando a relevância e contribuição para o conhecimento científico na área de reciclagem e gestão de baterias de íon lítio.

**Palavras-chave:** bateria de íon lítio; reciclagem; descarga; fim de vida; NMC.

## ABSTRACT

The use of lithium-ion batteries (LIB) is experiencing exponential growth today, being a versatile and lightweight type of battery with high density and energy capacity and high recharge speed, in addition to presenting lower potential environmental impacts, gaining notoriety in various technological and economic sectors. Widely used in electronics and stationary energy sources, batteries are considered one of the main means for the transition from fossil to electric energy in the transport sector. However, related to the use of LIB advantages, the consumption of lithium (Li) and metals that make up the battery such as cobalt (Co), nickel (Ni), manganese (Mn), copper (Cu), and aluminum (Al) has increased significantly, drawing the attention of various productive sectors. During their useful life, batteries destined for recycling may have been subjected to mechanical, electrical, or thermal excesses. Their residual charge can cause damage and impacts during the end-of-life process. In this context, the discharge of residual energy from LIBs is an important process to minimize environmental impacts and scale up LIB recycling within the industry. The objective of this work was to develop and test a system that prioritizes improving environmental performance in the discharge of residual energy from nickel-manganese-cobalt (NMC) lithium-ion batteries. The system includes monitoring the voltage variation during the discharge process, using a low environmental impact saline solution as a conductor between the cathode and anode. Using the Systematic Literature Review method, it was possible to characterize theoretical studies on the residual energy discharge processes of LIBs. Subsequently, 14 electrical discharge tests were carried out using magnesium sulfate ( $\text{MgSO}_4$ ) and sodium sulfate ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) solutions in different concentrations. Additionally, the interferences of three parameters were evaluated: solution agitation, solution recirculation, and the insertion of a sacrificial metal to minimize cell terminal corrosion. The best result, referring to the lowest residual voltage obtained after the experiments, was achieved using  $\text{MgSO}_4$  at a concentration of 1.0 mol/L and recirculation. Monitoring the cells throughout the experiment revealed that, even with minor physical damage, the system functioned continuously and accurately throughout all experiments. The existing literature on the subject presents a significant gap, highlighting the relevance and contribution to scientific knowledge in lithium-ion battery recycling and management.

**Keywords:** lithium-ion battery; recycling; discharge; end of life; NMC.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 — Estrutura da bateria.....                                                                                                         | 13 |
| Figura 2 — (a)Vista das configurações do suporte no software PrusaSlicer® para impressão em 3D e (b) software Fusion360®.....                | 22 |
| Figura 3 — Vista do suporte com a célula e a mola acoplada.....                                                                              | 22 |
| Figura 4 — Experimentos 1 a 4 utilizando $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .....                                                     | 29 |
| Figura 5 — Células após a submersão em solução salina para o primeiro experimento utilizando $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ..... | 30 |
| Figura 6 — Experimento 5 a 8 utilizando $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .....                                                                       | 31 |
| Figura 7 — Experimentos 1 a 4 da segunda rodada utilizando $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .....                                   | 33 |
| Figura 8 — Experimentos 5 a 8 da segunda rodada utilizando $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .....                                                    | 35 |
| Figura 9 — Experimentos 1 a 4 da terceira rodada utilizando $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .....                                                   | 39 |
| Figura 10 — Experimentos 5 a 6 da terceira rodada utilizando $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .....                                                  | 39 |
| Figura 11 — Experimentos 7 a 10 da terceira rodada utilizando $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .....                                | 40 |
| Figura 12 — Diferença da coloração no experimento utilizando $\text{MgSO}_4 - 1,0 \text{ mol/L}$ .....                                       | 41 |

## **LISTA DE QUADROS**

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1 — Aplicação do Filtro 1: leitura do título, resumo e palavras-chave..... | 25 |
| Quadro 2 — Aplicação do Filtro 2: Leitura da introdução e conclusão.....          | 26 |
| Quadro 3 — Aplicação do Filtro 3: leitura completa dos artigos.....               | 27 |



## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 — Parâmetros utilizados em cada experimento.....                                                                            | 20 |
| Tabela 2 — Parâmetros utilizados em cada experimento.....                                                                            | 23 |
| Tabela 3 — Resultados da 1ª Rodada de experimentos com $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ com concentração de 0,5 mol/L.....  | 29 |
| Tabela 4 — Resultados da 1ª Rodada de experimentos com $\text{Na}_2\text{SO}_4$ com concentração de 1,0 mol/L.....                   | 30 |
| Tabela 5 — Resultados da 2ª Rodada de experimentos com $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ com concentração 1 mol/L.....       | 32 |
| Tabela 6 — Resultados da 2ª Rodada de experimentos com $\text{Na}_2\text{SO}_4$ com concentração de 1,5 mol/L.....                   | 34 |
| Tabela 7 — Especificações e células submetidas a imersão para os experimentos da terceira rodada.....                                | 36 |
| Tabela 8 — Experimentos 1 a 6 da terceira rodada utilizando $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .....                                           | 37 |
| Tabela 9 — Experimentos 7 a 10 da terceira rodada utilizando $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ com concentração variada..... | 39 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BRG – *Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe*

DOE – *Design of Experiment*

EoL – *End of Life*

IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

LCO – Óxido de Lítio Cobalto ( $\text{LiCoO}_2$ )

LIB – *Lithium-Ion Battery*

MMA – Ministério do Meio Ambiente

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

WEEE - *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 Sistemática ..... | 17 |
| 3.2. Processo Experimental.....              | 18 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....              | 24 |
| 4.1. Revisão Bibliográfica Sistemática ..... | 24 |
| 4.2. Processo Experimental.....              | 28 |
| 4.2.1. 1ª Rodada de Experimentos.....        | 28 |
| 4.2.2. 2ª Rodada de Experimentos.....        | 31 |
| 4.2.3. 3ª Rodada de Experimentos.....        | 36 |
| 5. CONCLUSÕES .....                          | 42 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....              | 44 |
| APÊNDICE A – Palavras-chave.....             | 49 |
| APÊNDICE B – Especificações das LIBs .....   | 50 |

## 1. INTRODUÇÃO

O uso de baterias de íon lítio (do inglês, *lithium-ion battery* ou LIB) apresenta um crescimento exponencial na atualidade. Reconhecida pelo Prêmio Nobel de Química em 2019, este tipo de bateria é versátil e leve, possui alta densidade e capacidade energética e elevada velocidade de recarga, além de apresentar menores potenciais de impactos ambientais (FEM, 2019; Smith, 2020; Habib; Hansdóttir; Habib, 2020).

Por estas e outras razões, as LIBs são amplamente utilizadas em equipamentos eletrônicos, de telecomunicações em fontes estacionárias de energia, sendo consideradas um dos principais meios para a transição da matriz energética fóssil para a elétrica no setor de transportes (Bradley *et al.*, 2017; FEM, 2019; Smith, 2020; An, 2020). Essa aplicação se estende a veículos automotores, motocicletas, patinetes, ônibus, aviões, entre outros, evidenciando sua importância crescente em diversas indústrias e no esforço global para a descarbonização (Tarascon & Armand, 2020; Zhang *et al.*, 2023).

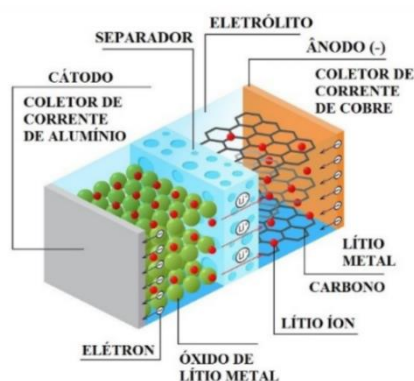
As LIBs são amplamente utilizadas em vários setores econômicos globais devido à sua importância na integração com fontes de energia renováveis, como a solar e a eólica. De acordo com o instituto alemão BRG (2019), o consumo de lítio continua a aumentar consideravelmente devido à crescente demanda por LIBs. Em 2020, a demanda global por lítio foi estimada em aproximadamente 93.000 toneladas, e espera-se que esse número cresça significativamente para atender à expansão das tecnologias de armazenamento de energia e à produção de veículos elétricos. Projeções indicam que até 2030, a demanda anual de lítio pode ultrapassar 1,8 milhão de toneladas (Grosjean *et al.*, 2022; Anderson *et al.*, 2023).

A produção de LIBs depende fortemente da disponibilidade de metais críticos como lítio (Li), cobalto (Co), alumínio (Al), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e níquel (Ni), entre outros. Esses metais têm fontes naturais limitadas, e algumas estão enfrentando uma escassez crescente devido à alta demanda (*International Energy Agency*, 2021). Por exemplo, o cobalto, essencial na fabricação de cátodos de baterias, é comumente obtido como subproduto da mineração de níquel e cobre, o que agrava os desafios de sua cadeia de suprimento (Mayyas; Steward; Mann, 2018; Grosjean *et al.*, 2022). Além disso, a dependência de fontes limitadas aumenta a vulnerabilidade das cadeias de produção de LIBs a flutuações de mercado e questões geopolíticas, o que pode impactar a sustentabilidade a longo prazo dessas tecnologias.

Uma célula de íon lítio é uma bateria recarregável que armazena e libera energia elétrica por meio do movimento de íons de lítio entre dois eletrodos: o cátodo e o ânodo. O cátodo, ou eletrodo positivo, pode ser composto por diferentes materiais de óxido metálico, incluindo óxido de cobalto de lítio ( $\text{LiCoO}_2$ ), óxido de ferro de lítio ( $\text{LiFePO}_4$ ) e óxido de manganês de lítio ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ) (Liu *et al.*, 2020). Recentemente, a química NMC (Níquel-Manganês-Cobalto) tem ganhado destaque devido à sua combinação equilibrada de capacidade, estabilidade e custo, sendo amplamente utilizada em veículos elétricos e dispositivos eletrônicos portáteis (Li *et al.*, 2021). O NMC, com a composição  $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z)\text{O}_2$ , oferece vantagens significativas em termos de densidade energética e durabilidade, sendo amplamente utilizado em aplicações de veículos elétricos e armazenamento de energia (Zheng *et al.*, 2021). O ânodo, ou eletrodo negativo, é tradicionalmente feito de grafite, que intercala íons de lítio de forma eficiente. Alternativas ao grafite, como compostos de silício, estão sendo exploradas para melhorar a capacidade, apesar dos desafios relacionados à sua expansão volumétrica (Jin *et al.*, 2020). Durante a descarga, os íons de lítio se movem do ânodo para o cátodo, liberando energia elétrica.

O eletrólito pode ser uma solução líquida ou um sólido que fica dentro da célula de uma bateria para permitir a movimentação entre os eletrodos. Já o separador é uma membrana porosa que impede o contato direto entre o cátodo e o ânodo, evitando curtos-circuitos, sendo assim, eficiência e a segurança das baterias de íon lítio dependem fortemente dos materiais utilizados nos eletrodos e da interação entre eles (Tarascon & Armand, 2022; Goodenough & Kim, 2022; Manthiram *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2023). Esses aspectos são cruciais para a inovação e o aprimoramento contínuo das tecnologias de armazenamento de energia.

**Figura 1** — Estrutura da bateria.



Fonte: Process Safety Process, 2022.

O fechamento do ciclo de vida das LIBs é essencial para diversos setores obterem sustentabilidade econômica, e especialmente para o alcance dos objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS) da Agenda 21 da Organização das Nações Unidas (ONU), promovendo a Economia Circular em vários setores econômicos mundiais. Existem diferentes estratégias de fim de vida do produto (*End of Life* – EoL). No entanto, após esgotadas as possibilidades, a reciclagem é uma das estratégias EoL que inevitavelmente deverá ser realizada para o fechamento do ciclo de vida, para a gestão dos resíduos sólidos e para a Economia Circular como previsto na *Waste Electrical and Electronic Equipment Directive* (WEEE, 2002), a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS; Brasil, 2011), o acordo setorial firmado entre o Ministério do Meio Ambiente e as empresas produtoras de equipamentos eletrônicos, incluindo baterias (MMA, 2019) e os decretos que reforçam e aperfeiçoam respectivamente a implementação da PNRS (Brasil, 2020, Brasil, 2022).

Para o processo de reciclagem é requerido que as LIBs estejam com uma tensão de segurança para a descarga, portanto, antes do processo de reciclagem das células, é importante destacar que existem várias maneiras de realizar a descarga elétrica de LIBs. Dentre os métodos empregados para o processo de descarga das LIBs, os métodos elétricos e eletroquímicos se destacam por suas abordagens distintas e complementares. Os métodos elétricos frequentemente utilizam resistores conectados às células por meio de circuitos elétricos, o que permite a avaliação da performance das baterias sob condições controladas e a determinação de características como resistência interna e eficiência de carga e descarga (Shaw-Stewart *et al.*, 2019). Em contraste, os métodos eletroquímicos envolvem a imersão das células em soluções contendo sais como sódio (Na), potássio (K) e amônio (NH<sub>4</sub>), entre outros, o que permite uma análise mais aprofundada das interações químicas e da estabilidade dos materiais da bateria durante a operação (Lee *et al.*, 2022).

Segundo Ojanen *et al.* (2018), a descarga eletroquímica é particularmente destacada por ser um método seguro, de baixo custo e altamente eficiente, tornando-o ideal para processos como o de reciclagem de LIBs. A pesquisa de Ojanen e colaboradores ressalta que esse método não só reduz os custos associados à gestão de baterias usadas, mas também contribui significativamente para a sustentabilidade. Diversos estudos corroboram a eficácia da descarga eletroquímica na reciclagem e remanufatura de LIBs. Por exemplo, Zhang *et al.* (2013) e Li *et*

*al.* (2016) exploraram a utilização deste método para diferentes finalidades, incluindo a recuperação de metais e o reprocessamento de componentes da bateria. Ambos os estudos convergem para a conclusão de que a descarga eletroquímica é uma abordagem prática e eficiente, evidenciando sua importância para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes de reciclagem e gestão de baterias ao final de seu ciclo de vida.

Até o momento, uma busca atualizada da literatura não identificou um método de descarga eletroquímica em solução salina de LIBs baseado em princípios de sustentabilidade ambiental, viabilidade econômica e segurança no trabalho que possibilite o escalonamento industrial.

No decorrer de sua vida útil, as baterias destinadas à reciclagem podem ter sido submetidas a excessos mecânicos (choques, perfurações, compressões), excessos elétricos (curto-circuito, sobrecarga) e excessos térmicos (superaquecimento). Desta forma, as baterias de íon lítio tornam-se mais suscetíveis a sobrecargas, o que pode levar a explosões. Por isso, a descarga das baterias é imprescindível para evitar que ocorram acidentes durante o transporte, o armazenamento e, especialmente, durante o processo de reciclagem (Zhang *et al.*, 2022; Sun *et al.*, 2023). Na técnica mais comumente utilizada, as baterias são esmagadas, cortadas e trituradas antes do processo de reciclagem, o que pode causar grandes explosões devido à energia residual presente nas baterias. Mesmo em processos em que não há cominuição, a abertura das baterias pode resultar em sérios acidentes com possíveis explosões, caso essa energia residual não seja adequadamente esgotada antes do processo (XIAO; ZHANG; LI, 2020).

Dada a importância do processo de descarga da energia residual das LIBs para a sua reciclagem, e, portanto, para o fechamento do seu ciclo de vida, fortalecendo a Economia Circular. Considerando a falta de estudos e trabalhos científicos que propuseram este processo de forma sistematizada e estruturada, dentro dos princípios delimitados, esta proposta de trabalho apresenta um potencial de contribuição teórica e prática para um tema relevante e atual de pesquisa.

Portanto, a questão de pesquisa que ainda precisa ser respondida e que norteará este trabalho é: Como deve ser estruturado e sistematizado um processo de descarga elétrica residual fundamentado em princípios de sustentabilidade ambiental, de viabilidade econômica e de segurança laboral?

## 2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi desenvolver e testar um sistema para a descarga da energia residual das LIBs de forma economicamente viável, que permita o monitoramento da variação da tensão durante o processo de descarga e otimizar as condições que favoreçam a descarga da energia residual das LIBs do tipo NMC, para isto são listados os seguintes itens:

- i. Realizar uma revisão bibliográfica sistemática acerca das tecnologias de descarga de LIBs visando sua reciclagem;
- ii. Definir uma solução salina que atue como um condutor conectando catodo e anodo das células do tipo NMC, e que tenha um impacto ambiental baixo;
- iii. Estabelecer um sistema de monitoramento estável e contínuo durante todo o tempo de imersão da bateria na solução salina, utilizando um sistema embarcado;
- iv. Avaliar a influência da agitação no processo de descarga;
- v. Avaliar a influência da recirculação no processo de descarga;
- vi. Avaliar a inclusão de um metal de sacrifício na inibição da corrosão dos terminais da bateria;



### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A primeira etapa do trabalho foi realizar uma Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS), em que foram estudados e analisados processos experimentais de descarga de LIBs do tipo NMC. Em sequência, foram planejados e montados os processos experimentais.

#### 3.1. Revisão Bibliográfica Sistemática

Uma RBS representa um método científico que se vale de buscas exaustivas e análises críticas de publicações científicas, como artigos, livros e teses, em uma determinada área do conhecimento, com o intuito de elucidar o estado-da-arte sobre o tema de pesquisa, adotando uma abordagem rigorosa e científica (Garcia et al., 2021; Silva *et al.*, 2022).

O presente estudo adotou o modelo denominado RBS Roadmap (Conforto; Amaral; Silva, *et al.* 2011) para conduzir a revisão bibliográfica de forma sistemática. Conforme delineado por Conforto (2011), essa abordagem combina três métodos de pesquisa científica: revisão de literatura, estudo de casos e pesquisa de campo. Esses métodos são integrados para proporcionar uma análise mais abrangente e robusta na área de engenharia. No âmbito deste trabalho, a estratégia empregada consiste em uma revisão da literatura para uma investigação acerca da descarga de baterias de íon lítio, com o objetivo de explorar suas possibilidades de reciclagem.

Inicialmente, foram estabelecidos os termos que representam o campo de pesquisa a ser investigado, a partir de uma cuidadosa seleção de palavras-chave. Essa seleção segue um processo de definição, teste e adaptação, no qual são avaliadas diferentes combinações de termos e operadores lógicos de busca (Conforto; Amaral; Silva, 2011).

Para a definição dessa listagem, foram introduzidas duas questões norteadoras: qual é o campo de pesquisa a ser investigado e quais são os objetivos da pesquisa? O campo de pesquisa aborda a questão da energia residual em baterias, enquanto os objetivos incluem a análise de como um processo de descarga elétrica residual deve ser sustentável ambientalmente, viável economicamente e seguro para os trabalhadores.

Durante o processo de definição e teste das palavras-chave, foi essencial adotar uma base de dados de referência. As palavras-chave, que estão apresentadas no Anexo A, foram testadas em conjunto com diferentes operadores lógicos de busca, visando alcançar os melhores resultados (Harris et al., 2022; Smith; Johnson, 2023). Nessa etapa, foram utilizadas as seguintes base de dados: Scopus, IEEE Xplore e ScienceDirect.

Para o início das análises, foram implementados filtros para melhor direcionamento da busca e seleção dos artigos. O primeiro filtro consiste na análise do título, resumo e palavras-chave dos 18 artigos obtidos anteriormente. Em seguida, o segundo filtro engloba a leitura da introdução e conclusão dos artigos selecionados após o primeiro filtro. Incorporando critérios de inclusão e qualificação específicos, ajustados conforme o tema da pesquisa, com o objetivo de priorizar os artigos mais relevantes e identificar aqueles mais adequados ao estudo (Conforto; Amaral; Silva, 2011)

Os preceitos de inclusão e qualificação adotados foram:

- i. Estudos empíricos a fim de buscar dados atualizados e convenientes com o tema abordado na linha de pesquisa proposta.
- ii. Ter um custo econômico viável.
- iii. Abordagem ambiental e sustentável para o descarte das LIBs.
- iv. Ter uma finalidade onde haja uma melhoria no descarte exclusivamente da bateria composta por íon-lítio.

Por fim, o terceiro filtro consiste na leitura completa dos artigos selecionados após a aplicação do segundo filtro. Este último estágio é crucial 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. Durante essa etapa, foram 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 sejam incluídos na revisão bibliográfica sistemática.

### **3.2. Processo Experimental**

Para a realização do procedimento experimental, houve uma parceria com uma empresa nacional que forneceu uma grande quantidade de LIBs, cujas especificações estão listadas no Anexo B, para que os experimentos pudessem ocorrer. Foi definido um cronograma de atividades primordiais para realizar os experimentos com base na quantidade de células disponíveis e controlados por meio de *Design of Experiments* (DoE) (Montgomery, 2019). Segundo Weissman e Anderson (2015) e Murray *et al.* (2016), o DoE é uma ferramenta poderosa para fundamentar o método de pesquisa experimental, podendo ser utilizada em vários

estágios do desenvolvimento de uma tecnologia, com eficiência e também visando a sua expansão.

Os resultados das experiências preliminares otimizadas de DoE, são analisados para descobrir quais fatores influenciam os resultados de maneira estatisticamente relevante e quais são interdependentes, se for o caso.

A distribuição dos ensaios foi realizada empregando o método Taguchi, este método emprega uma ordem aleatória para conduzir os experimentos, visando minimizar a influência de fatores externos e, conseqüentemente, alcançar resultados mais robustos.

A abordagem Taguchi representa uma técnica eficiente para otimizar as condições de um processo, ao mesmo tempo em que melhora seu desempenho global. Diferenciando-se dos métodos de otimização convencionais, que geralmente permitem a manipulação de apenas um parâmetro por vez, o método Taguchi possibilita a análise simultânea de múltiplos parâmetros, resultando em economia de tempo e recursos (HOSSAIN *et al.*, 2020).

Para o experimento inicial, optou-se pela utilização do sal sulfato de magnésio heptahidratado ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) e o sal sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), devido a sua maior disponibilidade no mercado e ao baixo custo em comparação com outros sais. As concentrações estudadas estão apresentadas na Tabela 1.

Os parâmetros de interferência avaliados nos experimentos foram:

- i. Recirculação: Onde, por meio de uma bomba e com o auxílio de mangueiras foi feita a circulação da solução salina.
- ii. Agitação magnética: Foi usado um agitador magnético Fisatom com agitação constante com o propósito de agitar a solução dentro do recipiente do experimento;
- iii. Metal de sacrifício: Foi utilizada a lâ de aço-carbono a fim de minimizar a corrosão dos terminais das baterias.
- iv. Todos os Parâmetros em conjunto;

Durante os experimentos, foram utilizados parâmetros específicos para cada experimento, incluindo sal, fator de influência e concentração, conforme apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1** — Parâmetros utilizados em cada experimento.

| 1º Rodada de Experimentos |                                      |                             |              |
|---------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|--------------|
| Experimentos              | Sal                                  | Fatores de influência       | Concentração |
| 1                         | MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O | Todos em conjunto           | 0,5 mol/L    |
| 2                         |                                      | Somente recirculação        |              |
| 3                         |                                      | Somente metal de sacrifício |              |
| 4                         |                                      | Somente agitação            |              |
| 5                         | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>      | Somente agitação            | 1,0 mol/L    |
| 6                         |                                      | Somente recirculação        |              |
| 7                         |                                      | Todos em conjunto           |              |
| 8                         |                                      | Soemnte metal de sacrifício |              |
| 2º Rodada de Experimentos |                                      |                             |              |
| Experimentos              | Sal                                  | Parâmetros                  | Concentração |
| 1                         | MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O | Somente agitação            | 1,0 mol/L    |
| 2                         |                                      | Somente recirculação        |              |
| 3                         |                                      | Todos em conjunto           |              |
| 4                         |                                      | Somente metal de sacrifício |              |
| 5                         | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>      | Todos em conjunto           | 1,5 mol/L    |
| 6                         |                                      | Somente metal de sacrifício |              |
| 7                         |                                      | Somente agitação            |              |
| 8                         |                                      | Somente recirculação        |              |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para otimizar o uso do laboratório, os experimentos foram divididos em 1ª e 2ª rodadas de ensaios, utilizando 1,0 L de solução para cada um dos sais.

Na fase de experimentos iniciais, sendo elas a 1º e a 2º Rodadas de experimentos, foram realizados no total 16 ensaios. Os experimentos consistiram na submersão das amostras de baterias em solução salina, por 7 horas e ao final de cada experimento as baterias passaram pela secagem em estufa a 80°C. Na primeira rodada, as tensões foram obtidas por meio de um multímetro intervalos de 1 hora e a tensão foi medida ao final da secagem das células.

Para a Segunda rodada de experimentos, foi programado um voltímetro com Arduíno sendo assim possível obter as medidas das células sem retirá-las da solução salina. Foram desenvolvidos suportes impressos em uma impressora 3D, onde por meio de furos foi possível conectar fios de cobre a fim de que os fios pudessem ter suas pontas conectadas tanto nos polos

das baterias como também nas garras do tipo jacaré que, por seu lado, estavam conectadas a Protoboard e ao Arduíno.

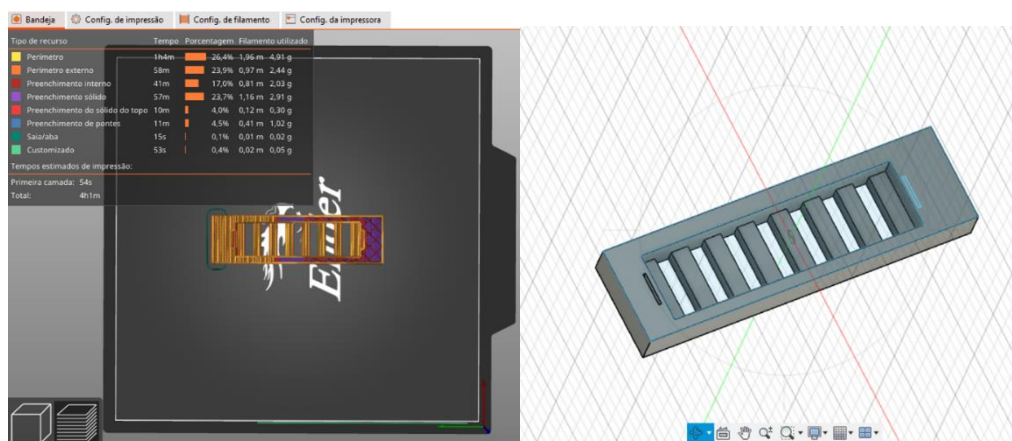
Para registrar e salvar as tensões de minuto a minuto, utilizou-se o software *Processing*® para melhor análise dos resultados.

Para um melhor controle dos resultados dos experimentos, as 30 células do tipo NMC foram identificadas, catalogadas e tiveram suas especificações definidas, como especificações químicas, tensão residual obtida por meio de um multímetro, limites de tensão e fabricante. Para este estudo foram selecionadas as células que apresentavam uma tensão residual superior a 2,5 V.

Após a seleção as células foram descaracterizadas, todos os envoltórios plásticos e o isolante, foram removidos e as células foram identificadas a partir de códigos únicos.

Após a conclusão dos experimentos da primeira rodada, foram implementadas melhorias nos dispositivos experimentais. Devido à corrosão dos suportes e cabos de cobre em alguns experimentos, novos suportes de baterias foram desenvolvidos e impressos em uma impressora 3D. Esses novos suportes foram projetados para proporcionar maior estabilidade às células submersas na solução salina ao longo de todo o experimento, com um design recuado para oferecer proteção adicional às pontas dos cabos de cobre. Além disso, foram adicionadas molas nas extremidades dos cabos de cobre para se adaptarem aos polos das baterias.

**Figura 2** — (a) Vista das configurações do suporte no software PrusaSlicer® para impressão em 3D e (b) software Fusion 360®.



Fonte: Elaborada pelo autor.

**Figura 3** — Vista do suporte com a célula e a mola acoplada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a terceira fase dos experimentos, foram propostos ensaios otimizados, com base nos resultados obtidos na 1º e 2º Rodada. Os parâmetros de influência permaneceram os mesmos, assim como os sais utilizados: sulfato de magnésio heptahidratado ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) e sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), dissolvidos em água deionizada com agitação magnética para formar uma solução salina de 1,0 L. As concentrações estudadas estão detalhadas na Tabela 2.

**Tabela 2** — Parâmetros utilizados em cada experimento.

| Experimentos | Sal                                       | Fatores de influência        | Concentração |
|--------------|-------------------------------------------|------------------------------|--------------|
| 1            | $\text{Na}_2\text{SO}_4$                  | Somente agitação magnética   | 1,0 mol/L    |
| 2            |                                           | Somente recirculação         |              |
| 3            |                                           | Todos os fatores em conjunto |              |
| 4            |                                           | Somente metal de sacrifício  |              |
| 5            | $\text{Na}_2\text{SO}_4$                  | Somente agitação magnética   | 1,5 mol/L    |
| 6            |                                           | Somente metal de sacrifício  |              |
| 7            | $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ | Somente agitação magnética   | 0,5 mol/L    |
| 8            |                                           | Todos os fatores em conjunto |              |
| 9            |                                           | Somente metal de sacrifício  |              |
| 10           | $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ | Somente recirculação         | 1,0 mol/L    |

Fonte: Elaborada pelo autor.

A terceira rodada consiste em experimentos otimizados que seguem os mesmos princípios das primeiras duas rodadas, ou seja, com 7 horas de imersão salina e os mesmos parâmetros de influência. A otimização dos aparatos experimentais permite obter maior precisão nos dados, também foi utilizada uma bateria de referência fora da imersão salina, para que fosse possível acompanhar grandes variações nas tensões afim de entender se houve alguma falha na leitura das tensões feita pelo Arduino ou algum fio que oxidou durante o experimento, a bateria apresentava uma tensão constante de 3,55 V durante todos os experimentos.

Um fator estudado nesta rodada foi a variação das concentrações molares dos sais. A medição da tensão após 24 horas não foi contabilizada, pois o objetivo principal foi compreender a validação do monitoramento das células durante as 7 horas de experimento. Os experimentos foram divididos com base na classificação da concentração molar do sal.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para um melhor entendimento dos resultados, foi mantida a mesma divisão do método de pesquisa. A primeira etapa abrange o embasamento teórico inicial obtido a partir da revisão bibliográfica sistemática (RBS), enquanto a segunda apresenta os resultados do processo experimental.

### 4.1. Revisão Bibliográfica Sistemática

Após o teste utilizando diversas bases de dados para a captura dos artigos, a ScienceDirect foi selecionada como única referência devido à qualidade e abrangência dos resultados obtidos.

Depois da realização dos testes com diversas combinações utilizando as palavras-chave listadas e os operadores lógicos de buscas “AND” e “OR”, foi estabelecido o seguinte arranjo: "Lithium ion battery" AND "discharge" AND "residual energy" AND "recycling". Este arranjo foi aplicado como filtro, restringindo a busca a artigos de pesquisa publicados entre os anos de 2018 e 2023, resultando em uma amostra de 18 artigos. Seguindo o modelo RBS Roadmap (Conforto; Amaral; Silva, 2011), foram aplicados três filtros para melhor direcionamento da busca e seleção dos artigos que contribuíram para a fundamentação teórica e a discussão dos resultados da pesquisa

Após a definição das palavras-chave e a obtenção da amostra composta por 18 artigos, foi aplicado o primeiro filtro. O Quadro 1 exibe o resultado dos artigos após a aplicação do primeiro filtro, juntamente com os nomes dos autores e os títulos dos artigos, indicando se cada artigo se aplica ou não à pesquisa, bem como a justificativa para sua inclusão ou exclusão.

Com a implementação deste filtro, a amostra de artigos foi reduzida para 5, resultando na exclusão de 8 artigos que não se alinhavam à proposta da pesquisa. O Quadro 2 ilustra a aplicação do segundo filtro, fornecendo o número do artigo conforme definido no Quadro 1, os títulos dos artigos, indicando se cada artigo se aplica ou não ao segundo filtro, e as razões para a inclusão ou exclusão dos artigos.

O Quadro 3 detalha quais artigos satisfizeram ou não os critérios de inclusão e qualificação do terceiro filtro. As células destacadas fornecem a justificativa pela qual cada artigo foi excluído.



**Quadro 1** — Aplicação do Filtro 1: leitura do título, resumo e palavras-chave.

|    | Authors                                                                                                             | Article Title                                                                                                                                                                                      | Incluí | Excluí | Justificativa 1- Filtro 1 (Título + Resumo)                                                                                                                                                                                                                                                         |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Elena Mossali, Nicoletta Picone, Luca Gentilini, Olga Rodríguez, Juan Manuel Pérez, Marcello Colledani              | Lithium-ion batteries towards circular economy: A literature review of opportunities and issues of recycling treatments.                                                                           | x      |        | É um artigo de 2020 que passa por todos os filtros aplicados, será incluído nos filtros e é de importância para a pesquisa para que assim possamos usá-lo como citação ou referência no nosso artigo.                                                                                               |
| 2  | Lin Peng Yao, Qi Zeng, Ting Qi, Jia Li                                                                              | An environmentally friendly discharge technology to pretreat spent lithium-ion batteries.                                                                                                          | x      |        | É um outro artigo que se encaixa nos filtros aplicados, será incluído nos filtros e assim pode ser usado na pesquisa, porque além de abordar a questão ambiental do descarte da bateria ainda dá resultados de experimentos feitos que minimizam a tensão residual para melhor descarte da bateria. |
| 3  | Lin Yun, Duy Linh, Li Shui, Xiongbin Peng, Akhil Garg, Meenuprasanna Phung LE, Saeed Asghari, Jayne Sandoval        | Metallurgical and mechanical methods for recycling of lithium-ion battery pack for electric vehicles.                                                                                              | x      |        | É uma revisão bibliográfica de 2018, que se encaixa nos filtros aplicados e será usado na pesquisa porque aborda problemas de pesquisas encontrados ao longo do processo de reciclagem das embalagens das LIBs.                                                                                     |
| 4  | Akhil Garg, Li Wei, Ankur Goyal, Xujian Cui, Liang Gao                                                              | Evaluation of batteries residual energy for battery pack recycling: Proposition of stack stress-coupled-AI approach.                                                                               | x      |        | É um artigo de 2019, que passa por todos os filtros aplicados e realiza um método empírico com uma abordagem de inteligência artificial acoplada a tensão da pilha para analisar a energia residual que ainda permanece na bateria.                                                                 |
| 5  | Patrick Münster, Marcel Diehl, Joop Elmo Fierichs, Markus Bömer, Michael Ryan Hansen, Martin Winter, Philip Niehoff | Effect of Li plating during formation of lithium-ion batteries on their cycling performance and thermal safety.                                                                                    |        | x      | É um artigo de 2020, que será excluído pelos filtros, porque não se refere sobre o descarte ambientalmente correto das LIBs, porém pode ser de importância haver alguma citação ou referência no nosso artigo.                                                                                      |
| 6  | Jie Yang, Fu Gu, Jianfeng Guo                                                                                       | Environmental feasibility of secondary use of electric vehicle lithium-ion batteries in communication base stations.                                                                               |        | x      | É um artigo de 2020, que será excluído nos filtros, porque diz mais sobre a reciclagem, reaproveitamento e a utilização secundária, porém poderá ser usado no nosso artigo porque aborda questões e dados ambientais relacionados às LIBs.                                                          |
| 7  | Samuel D. Widjantoko, Fu Gu, Zheng Wang, Philip Hall                                                                | Selective liberation in dry milled spent lithium-ion batteries.                                                                                                                                    | x      |        | É um artigo de 2019, passa pelo primeiro filtro e por meio de métodos químicos utilizando oxido de lítio-cobalto e mecânicos que ajudam na liberação do material ativo do eletrodo positivo da LIB.                                                                                                 |
| 8  | Yelin Deng, Jianyang Li, Tonghui Li, Jingyi Zhang, Fan Yang, Chris Yuan                                             | Life cycle assessment of high capacity molybdenum disulfide lithium-ion battery for electric vehicles.                                                                                             |        | x      | O artigo é de 2017 e não se encaixa nos filtros porque estuda a bateria de íon-lítio dissulfeto de molibdênio.                                                                                                                                                                                      |
| 9  | Xiaoyu Li, Ke Pan, Guodong Fan, Rengui Lu, Churbo Zhu, Giorgio Rizzoni, Marcello Canova                             | A physics-based fractional order model and state of energy estimation for lithium-ion batteries. Part II: Parameter identification and state of energy estimation for LiFePO <sub>4</sub> battery. |        | x      | Artigo de 2017, que não se encaixa nos filtros, porém pode ser usado como referência ou citação no nosso artigo por conta do método desenvolvido para obter a estimativa do estado da bateria em diferentes estágios de envelhecimento.                                                             |
| 10 | Nak-Kyoon Ahn, Hyun-Woo Kim, Dae-Weon Kim, Basudev Swain                                                            | Valorization of waste NiMH battery through recovery of critical rare earth metal: A simple recycling process for the circular economy.                                                             |        | x      | O artigo não se encaixa porque aborda assuntos relacionados às baterias de NiMH.                                                                                                                                                                                                                    |
| 11 | Yelin Deng, Jianyang Li, Tonghui Li, Jianfeng Gao, Chris Yuan                                                       | Life cycle assessment of lithium-sulfur battery for electric vehicles.                                                                                                                             |        | x      | Artigo de 2017, que não se encaixa nos filtros porque fala sobre a bateria de lítio- enxofre, porém pode ser usado ou citado no nosso artigo caso haja algum descobrimento interessante nesse artigo.                                                                                               |
| 12 | Jichun Liu, Xue Chen, Yue Xiang, Da Huo, Junyong Lin                                                                | Optimal planning and investment benefit analysis of shared energy storage for electricity retailers.                                                                                               |        | x      | É um artigo de 2020, que não se encaixa nos filtros porque não aborda a LIB como principal fonte de energia e nem o descarte ambiental da mesma.                                                                                                                                                    |

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Quadro 2 — Aplicação do Filtro 2: Leitura da introdução e conclusão.**

|   | Authors                                                                                                       | Article Title                                                                                                            | Inclui 2 | Exclui 2 | Justificativa 2- Filtro 2 (Introdução + Conclusão)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Elena Mossali, Nicoletta Picone, Luca Gentilini, Olga Rodriguez, Juan Manuel Pérez, Marcello Colledani        | Lithium-ion batteries towards circular economy: A literature review of opportunities and issues of recycling treatments. |          | X        | O artigo não se inclui no filtro porque não se aprofunda o suficiente para a nossa pesquisa entretanto, artigo pode ser usado como referência pois, a introdução e a conclusão são bem relacionadas ao nosso assunto geral e também na conclusão são abordados temas que buscam melhorar o descarte das LIBs por meio de processos de reciclagem técnica e economicamente viável |
| 2 | Lin Peng Yao, Qi Zeng, Ting Qi, Jia Li                                                                        | An environmentally friendly discharge technology to pretreat spent lithium-ion batteries.                                | X        |          | A introdução e a conclusão do artigo visam uma melhora no descarte das LIBs por meio de processos químicos utilizando soluções que diminuem os riscos de explosões no descarte das mesmas, o artigo lido até agora se encaixa no filtro 2 e aborda pesquisas relevantes para o nosso artigo.                                                                                     |
| 3 | Liu Yun, Duy Linh, Li Shui, Xiongbin Peng, Akhil Garg, Mei Empréstimo Phung LE, Saeed Asghari, Jayne Sandoval | Metallurgical and mechanical methods for recycling of lithium-ion battery pack for electric vehicles.                    | X        |          | O artigo pontua assuntos bem parecidos com o nosso tema principal, se enquadra no filtro 2 porque é voltado para a questão das LIBs em veículos elétricos, esse artigo poderá ser usado na nossa pesquisa porque aborda a questão ambiental do descarte das LIBs e analisa através do processo mecânico e metalúrgicos um melhor descarte para as LIBs de VE.                    |
| 4 | Akhil Garg, Li Wei, Ankit Goyal, Xujian Cui, Liang Gao                                                        | Evaluation of batteries residual energy for battery pack recycling: Proposition of stack stress-coupled-AI approach      |          | X        | O artigo não se encaixa no filtro 2 porque é mais específico em estado de saúde da bateria antes de ser descartada e gerar um modelo matemático, ou seja faz uma previsão da tensão residual nas baterias, essa previsão é feita com métodos empíricos descritos no artigo, todo esse processo é usado para ajudar na melhoria do descarte das LIBs de uma célula.               |
| 5 | Samuel D. Widiyatmoko, Fu Gu, Zheng Wang, Philip Halla                                                        | Selective liberation in dry milled spent lithium-ion batteries.                                                          |          | X        | Não se encaixa no filtro 2 porém pode ser usado como citação ou referência para o nosso artigo e pesquisa porque propõe um método mecânico de descarte baseado em trituração e laminação da LIB de maneira ecológica, ou seja, procura o melhor ponto de corte para a liberação seletiva das LIBs.                                                                               |

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Quadro 3** — Aplicação do Filtro 3: Leitura completa dos artigos.

|   | Authors                                                                                                     | Article Title                                                                                         | Inclui 3 | Exclui 3 | Justificativa 3 - Filtro 3 (Leitura Total)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Lin Peng Yao; Qi Zeng; Ting Qi; Jia Li                                                                      | An environmentally friendly discharge technology to pretreat spent lithium-ion batteries.             | X        |          | O artigo tem muita coisa que pode ser usado na nossa pesquisa, o mesmo procura melhores soluções para retirar as tensões residuais que podem provocar danos ao meio ambiente ao descartar as LIBs e consequentemente haver uma melhora ambientalmente nos descartes das mesmas, além de apresentar uma solução rápida e eficiente em larga escala por meio de processos químicos utilizando NaCl, FeSO <sub>4</sub> e MnSO <sub>4</sub> , sendo o NaCl e o FeSO <sub>4</sub> as melhores soluções químicas para ajudar a reduzir a tensão havendo melhorias significativas na redução dos riscos ao meio ambiente. As soluções propostas no artigo englobam uma grande variedade de LIBs usadas em larga escala no dia a dia. |
| 2 | Liu Yun; Duy Linh; Li Shui; Xiongbai Peng; Akhil Garga; Meupréstino Phung LE; Saeed Asghari; Jayne Sandoval | Metallurgical and mechanical methods for recycling of lithium-ion battery pack for electric vehicles. |          | X        | O artigo não se enquadra no Filtro 3 porque não seria economicamente viável, além de ser voltado para LIBs de muitas células, porém o artigo pode ser usado como referência para a nossa pesquisa porque tem etapas que podem se encaixar nos nossos parâmetros, porém são muitas etapas que irão utilizar produtos caros e em geral, além do mais que as várias soluções apresentadas como a pirometalurgia e até mesmo o pré-tratamento são ou caros ou tem um impacto ambiental ainda significativo sendo um empecilho para a nossa pesquisa. Apesar de não se encaixar no filtro o artigo tem diferentes soluções que podem ser estudadas e aprimoradas para melhor descarte das LIBs.                                    |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Pode ser observado que 2 dos artigos selecionados no segundo filtro atenderam aos critérios estabelecidos para passar para o terceiro filtro, porém somente 1 artigo após o terceiro filtro atendeu a proposta da pesquisa.

Os artigos selecionados pelo 3º filtro, fornecem uma visão abrangente sobre a importância da reciclagem de baterias de íon-lítio, destacando os impactos ambientais negativos do descarte inadequado e a necessidade de conservação de recursos, servindo como uma base teórica sólida para este trabalho. Além disso, os artigos detalham o processo de descarga como um pré-tratamento essencial para realizar um descarte sustentável das baterias. A análise sistemática dos processos de descarga química e física, bem como a avaliação de diferentes soluções e pós metálicos condutores, oferece dados experimentais valiosos que podem ser utilizados para comparar e discutir os resultados que serão obtidos no trabalho. A escolha dos artigos também orientou a seleção dos sais, optando pelo mais ecológico, e a descrição dos modelos de descarga em larga escala fornece exemplos práticos e aplicáveis que podem ser discutidos na seção de resultados e discussão da tese. Além disso, os artigos abordam os desafios no processo de reciclagem, como a necessidade de sistemas mais eficientes e seguros para o fim de vida de uma bateria, e as estatísticas do crescimento do uso das baterias de íon-lítio em diversos setores da indústria, principalmente no setor de veículos elétricos.

## **4.2. Processo Experimental**

Nesta seção serão apresentados os resultados dos experimentos de acordo com a 1º, 2º e 3º rodada realizadas.

Primeiramente foi importante estabelecer um limite mínimo de tensão porque, se uma bateria não totalmente descarregada for esmagada durante a reciclagem, ela gerará uma corrente de curto-circuito, resultando em um forte aumento de temperatura devido aos componentes ativos das LIBs que liberam a carga remanescente durante a britagem, representando um risco para os equipamentos e as pessoas (XIAO; ZHANG; LI, 2020). Com base em testes controlados em laboratórios, foi determinado que com valores de tensão igual ou menores que 1,5 V a célula pode ser submetida aos processos subsequentes no processo de reciclagem sem que haja riscos de explosões ou ignição.

### **4.2.1. 1ª Rodada de Experimentos**

Como mostrado na Tabela 1, na primeira rodada foram utilizados o sal sulfato de magnésio heptahidratado ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) nas concentrações de 0,5 mol/L e 1,0 mol/L e o sal

sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) nas concentrações de 1,0 mol/L e 1,5mol/L. Todos os experimentos foram realizados utilizando 1,0 L de solução salina, onde as células foram imersas por 7 horas e as tensões medidas em intervalos de 1 hora. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos para o sal sulfato de magnésio heptahidratado ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ).

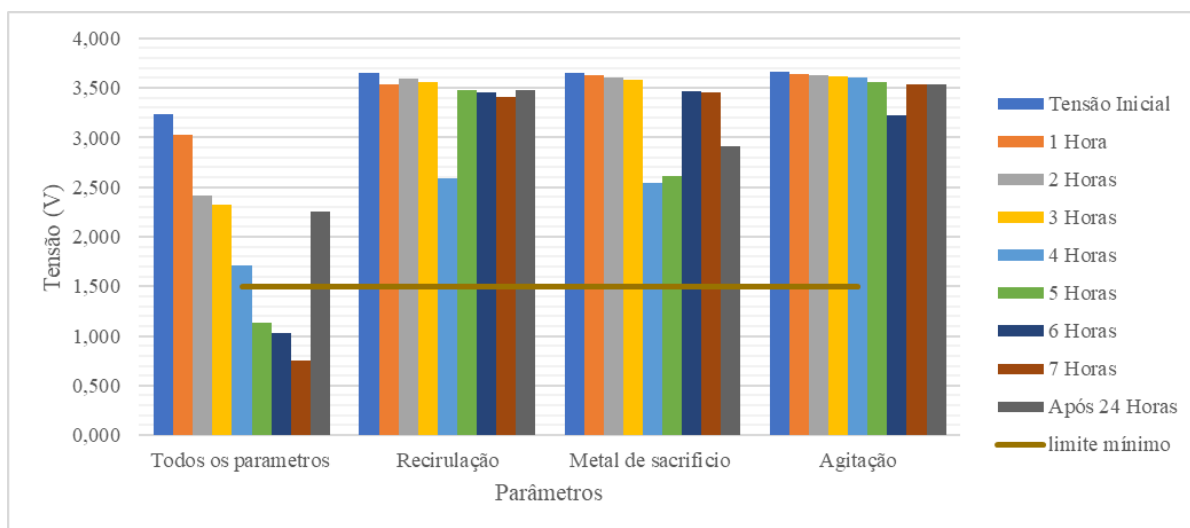
**Tabela 3** — Resultados da 1ª Rodada de experimentos com  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  e concentração de 0,5mol/L.

| <b>Experimento 1 - <math>\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}</math> - Todos os parâmetros - célula: 1ACNCM</b> |        |         |         |         |         |         |         |               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------------|
| Tensão Inicial                                                                                                     | 1 Hora | 2 Horas | 3 Horas | 4 Horas | 5 Horas | 6 Horas | 7 Horas | Após 24 Horas |
| 3,237                                                                                                              | 3,028  | 2,414   | 2,327   | 1,710   | 1,131   | 1,024   | 0,749   | 2,250         |
| <b>Experimento 2 - <math>\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}</math> - Recirculação - célula: 13VMNCM</b>       |        |         |         |         |         |         |         |               |
| Tensão Inicial                                                                                                     | 1 Hora | 2 Horas | 3 Horas | 4 Horas | 5 Horas | 6 Horas | 7 Horas | Após 24 Horas |
| 3,649                                                                                                              | 3,536  | 3,596   | 3,553   | 2,592   | 3,479   | 3,456   | 3,403   | 3,477         |
| <b>Experimento 3 - <math>\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}</math> - Metal de sacrifício - célula: 8VENCM</b> |        |         |         |         |         |         |         |               |
| Tensão Inicial                                                                                                     | 1 Hora | 2 Horas | 3 Horas | 4 Horas | 5 Horas | 6 Horas | 7 Horas | Após 24 Horas |
| 3,652                                                                                                              | 3,624  | 3,608   | 3,584   | 2,540   | 2,607   | 3,469   | 3,451   | 2,917         |
| <b>Experimento 4 - <math>\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}</math> - Agitação - célula: 3CZNCM</b>            |        |         |         |         |         |         |         |               |
| Tensão Inicial                                                                                                     | 1 Hora | 2 Horas | 3 Horas | 4 Horas | 5 Horas | 6 Horas | 7 Horas | Após 24 Horas |
| 3,663                                                                                                              | 3,640  | 3,631   | 3,613   | 3,604   | 3,561   | 3,226   | 3,536   | 3,539         |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Já em questão dos parâmetros de influência a agitação foi o único fator que atingiu os resultados esperados após as 7 horas de experimento.

**Figura 4** — Experimentos 1 a 4 utilizando  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .



Fonte: Elaborada pelo autor.

É possível observar que após as 7 horas de experimento, somente o experimento 1 atingiu um valor de tensão menor que o limite mínimo de 1,5V, esta célula foi submetida ao

experimento com todos os fatores de influência e ainda assim a bateria apresentou acréscimo de tensão após 24 horas.

Pode-se analisar que o experimento 4 utilizando somente a agitação como fator de influência foi o experimento onde a célula apresentou resultados menos satisfatórios, por não atingir o limite mínimo.

Foi possível observar também que as baterias ficaram de uma cor esverdeada em torno do metal, mesmo com o metal de sacrifício presente na solução as baterias foram corroídas, como mostrado na Figura 5.

**Figura 5** — Células após a submersão em solução salina para o primeiro experimento utilizando  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .



Fonte: Elaborada pelo autor.

Seguindo com a análise da primeira rodada de experimentos, na Tabela 4 foram analisados os resultados obtidos para o sal sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) nas concentrações de 1,0 mol/L.

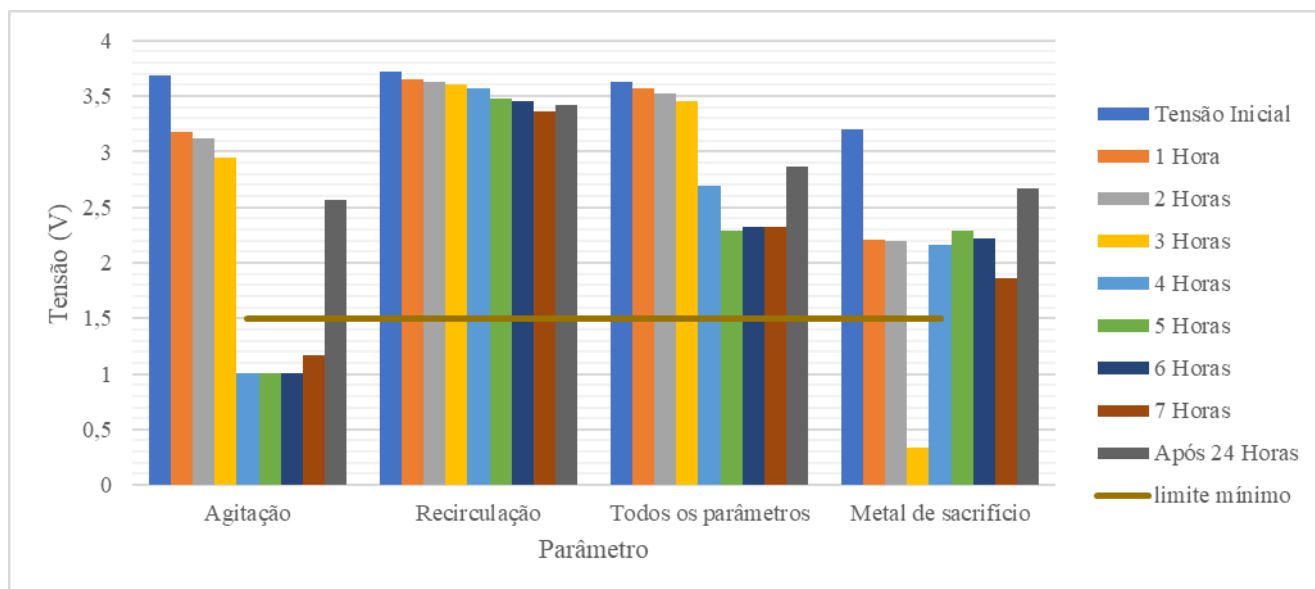
**Tabela 4** — Resultados da 1ª Rodada de experimentos com  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  com concentração de 1,0 mol/L.

| Experimento 5 - $\text{Na}_2\text{SO}_4$ - Agitação - célula: 5CZNCM            |        |         |         |         |         |         |         |               |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------------|
| Valores de tensão em (V)                                                        |        |         |         |         |         |         |         |               |
| Tensão Inicial                                                                  | 1 Hora | 2 Horas | 3 Horas | 4 Horas | 5 Horas | 6 Horas | 7 Horas | Após 24 Horas |
| 3,69                                                                            | 3,18   | 3,125   | 2,946   | 1,008   | 1,01    | 1,012   | 1,169   | 2,565         |
| Experimento 6 - $\text{Na}_2\text{SO}_4$ - Recirculação - célula: 1VCNCM        |        |         |         |         |         |         |         |               |
| Valores de tensão em (V)                                                        |        |         |         |         |         |         |         |               |
| Tensão Inicial                                                                  | 1 Hora | 2 Horas | 3 Horas | 4 Horas | 5 Horas | 6 Horas | 7 Horas | Após 24 Horas |
| 3,717                                                                           | 3,647  | 3,625   | 3,601   | 3,572   | 3,478   | 3,45    | 3,358   | 3,422         |
| Experimento 7 - $\text{Na}_2\text{SO}_4$ - Todos os parâmetros - célula: 4VENCN |        |         |         |         |         |         |         |               |
| Valores de tensão em (V)                                                        |        |         |         |         |         |         |         |               |
| Tensão Inicial                                                                  | 1 Hora | 2 Horas | 3 Horas | 4 Horas | 5 Horas | 6 Horas | 7 Horas | Após 24 Horas |
| 3,632                                                                           | 3,57   | 3,52    | 3,46    | 2,687   | 2,287   | 2,323   | 2,323   | 2,86          |
| Experimento 8 - $\text{Na}_2\text{SO}_4$ - Metal de sacrifício - célula: 2ACNCM |        |         |         |         |         |         |         |               |
| Valores de tensão em (V)                                                        |        |         |         |         |         |         |         |               |
| Tensão Inicial                                                                  | 1 Hora | 2 Horas | 3 Horas | 4 Horas | 5 Horas | 6 Horas | 7 Horas | Após 24 Horas |
| 3,203                                                                           | 2,205  | 2,196   | 0,338   | 2,16    | 2,289   | 2,22    | 1,863   | 2,664         |

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir dos valores apresentados na Tabela 4 é possível notar que baterias dos experimentos 5 e 6 apresentaram uma queda significativa na tensão após as 7 horas, porém para todas as células a tensão após 24 horas aumentou, ultrapassando o limite mínimo de 1,5V.

**Figura 6** — Experimento 5 a 8 utilizando  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .



Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao analisar os dados da Figura 6, fica evidente que todas as baterias testadas experimentaram uma diminuição na tensão após 24 horas, sem que nenhuma delas tenha alcançado valores inferiores a 1,5 V, o que é considerado um desempenho abaixo do ideal.

Por outro lado, para as outras baterias avaliadas, não foi observada uma diminuição significativa das tensões ao longo do experimento, sugerindo que a recirculação não teve um impacto substancial neste contexto específico do experimento 6.

Durante o experimento, também foi notada uma mudança na coloração da solução salina ao longo do tempo, assumindo uma tonalidade marrom devido à corrosão e à oxidação do metal de sacrifício utilizado. Este fenômeno ilustra como o ambiente e os materiais auxiliares podem influenciar na performance e na durabilidade das baterias durante testes prolongados.

#### 4.2.2. 2ª Rodada de Experimentos

Após a primeira rodada de experimentos, notou-se que embora tenha havido a descarga, os valores de tensão obtidos não alcançaram o valor mínimo de 1,5 V, os experimentos seguintes foram realizados utilizando o mesmo planejamento, tendo sido alterada apenas a

concentração da solução utilizada tanto para o  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , quanto para o  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Os resultados dos monitoramentos 1, 2, 3 e 4 com concentração de 1,0 mol/L estão apresentados na Tabela 5, os quais foram obtidos por meio de um acompanhamento contínuo utilizando voltímetro com Arduino. A tensão após a secagem também foi medida com o auxílio de um multímetro.

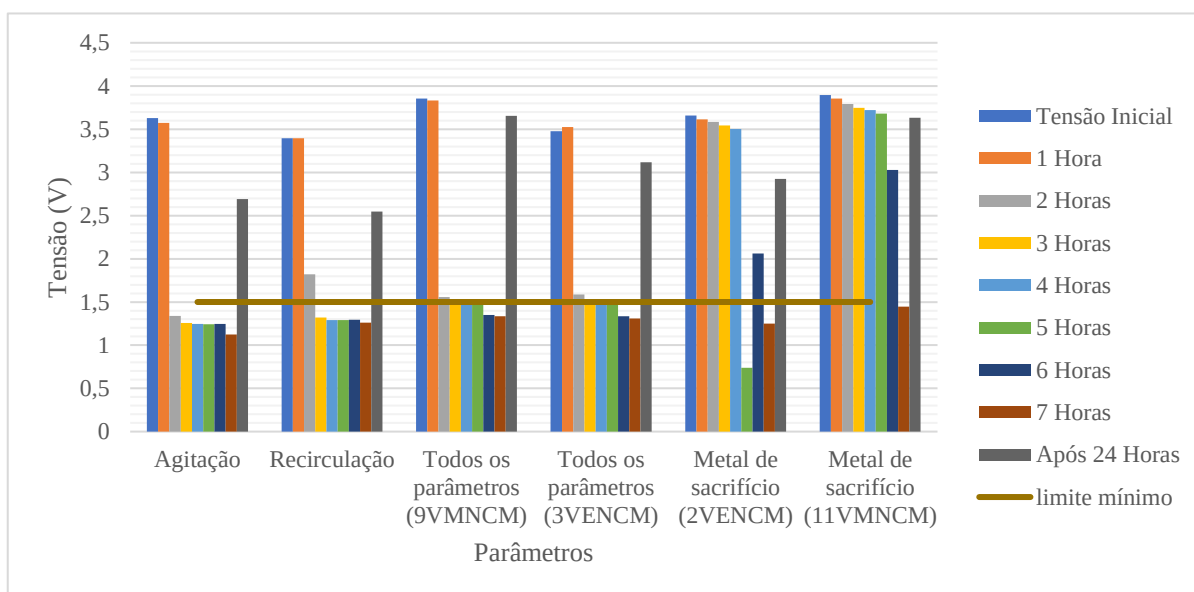
**Tabela 5** — Resultados da 2ª Rodada de experimentos com  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  utilizando 1 mol/L.

| <b>Experimento 1 - <math>\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}</math> - Agitação - célula: 7VENCM</b>                       |        |         |         |         |         |         |         |               |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------------|
| Valores de tensão em (V)                                                                                                      |        |         |         |         |         |         |         |               |
| Tensão Inicial                                                                                                                | 1 Hora | 2 Horas | 3 Horas | 4 Horas | 5 Horas | 6 Horas | 7 Horas | Após 24 Horas |
| 3,627                                                                                                                         | 3,574  | 1,339   | 1,256   | 1,246   | 1,242   | 1,246   | 1,125   | 2,692         |
| <b>Experimento 2 - <math>\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}</math> - Recirculação - célula: 5VENCM</b>                   |        |         |         |         |         |         |         |               |
| Valores de tensão em (V)                                                                                                      |        |         |         |         |         |         |         |               |
| Tensão Inicial                                                                                                                | 1 Hora | 2 Horas | 3 Horas | 4 Horas | 5 Horas | 6 Horas | 7 Horas | Após 24 Horas |
| 3,394                                                                                                                         | 3,394  | 1,821   | 1,32    | 1,29    | 1,29    | 1,295   | 1,261   | 2,545         |
| <b>Experimento 3 - <math>\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}</math> - Todos os parâmetros - células: 9VMNCM e 3VENCM</b>  |        |         |         |         |         |         |         |               |
| Valores de tensão em (V)                                                                                                      |        |         |         |         |         |         |         |               |
| Tensão Inicial                                                                                                                | 1 Hora | 2 Horas | 3 Horas | 4 Horas | 5 Horas | 6 Horas | 7 Horas | Após 24 Horas |
| 3,856                                                                                                                         | 3,832  | 1,558   | 1,509   | 1,49    | 1,48    | 1,349   | 1,334   | 3,656         |
| 3,476                                                                                                                         | 3,525  | 1,587   | 1,529   | 1,5     | 1,48    | 1,334   | 1,31    | 3,118         |
| <b>Experimento 4 - <math>\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}</math> - Metal de sacrifício - células: 2VENCM e 11VMNCM</b> |        |         |         |         |         |         |         |               |
| Valores de tensão em (V)                                                                                                      |        |         |         |         |         |         |         |               |
| Tensão Inicial                                                                                                                | 1 Hora | 2 Horas | 3 Horas | 4 Horas | 5 Horas | 6 Horas | 7 Horas | Após 24 Horas |
| 3,657                                                                                                                         | 3,613  | 3,584   | 3,545   | 3,501   | 0,74    | 2,06    | 1,251   | 2,925         |
| 3,895                                                                                                                         | 3,856  | 3,793   | 3,749   | 3,72    | 3,681   | 3,029   | 1,446   | 3,632         |

Fonte: Elaborada pelo autor.

A análise da Tabela 5 releva que as células selecionadas para o experimento não apresentaram tensões abaixo do limite mínimo após 24 horas de experimento. No entanto, observou-se uma queda significativa na tensão das baterias na maioria dos casos entre 5 e 7 horas de submersão em solução salina.



**Figura 7** — Experimentos 1 a 4 da segunda rodada utilizando  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .

Fonte: Elaborada pelo autor.

A análise dos resultados mostra que a última medida, após 24 horas, revelou tensões muito altas. A bateria utilizada no experimento com agitação, 7VENCM da marca Samsung, apresentou um menor crescimento após 7 horas de reação, porém sua tensão de 2,692 V ainda permaneceu acima do limite mínimo após 24 horas. Além disso, em solução salina, as baterias apresentaram tensões abaixo do limite mínimo de 1,5 V, contudo, semelhante à maioria dos experimentos anteriores, as células demonstraram um recarregamento espontâneo. O experimento 2 gerou os melhores resultados, com uma tensão final, após as 24 horas de 2,545 V.

No experimento 3, descrito na Tabela 5, nenhuma das duas células apresentaram uma tensão inferior a 3,0 V após 24 horas, ainda que durante a imersão em solução salina os resultados tenham sido satisfatórios entre as 6 e 7 horas de experimento. Adicionalmente, ao utilizar apenas metal de sacrifício, a tensão demorou a reduzir durante a submersão, diferentemente dos experimentos anteriores, onde as tensões caíram no período de 1 a 3 horas de reação. Mesmo após 24 horas, os resultados não foram satisfatórios.

Prosseguindo com a análise da segunda rodada de experimentos, a Tabela 6 apresenta os resultados obtidos para o sal sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) na concentração de 1,5 mol/L.

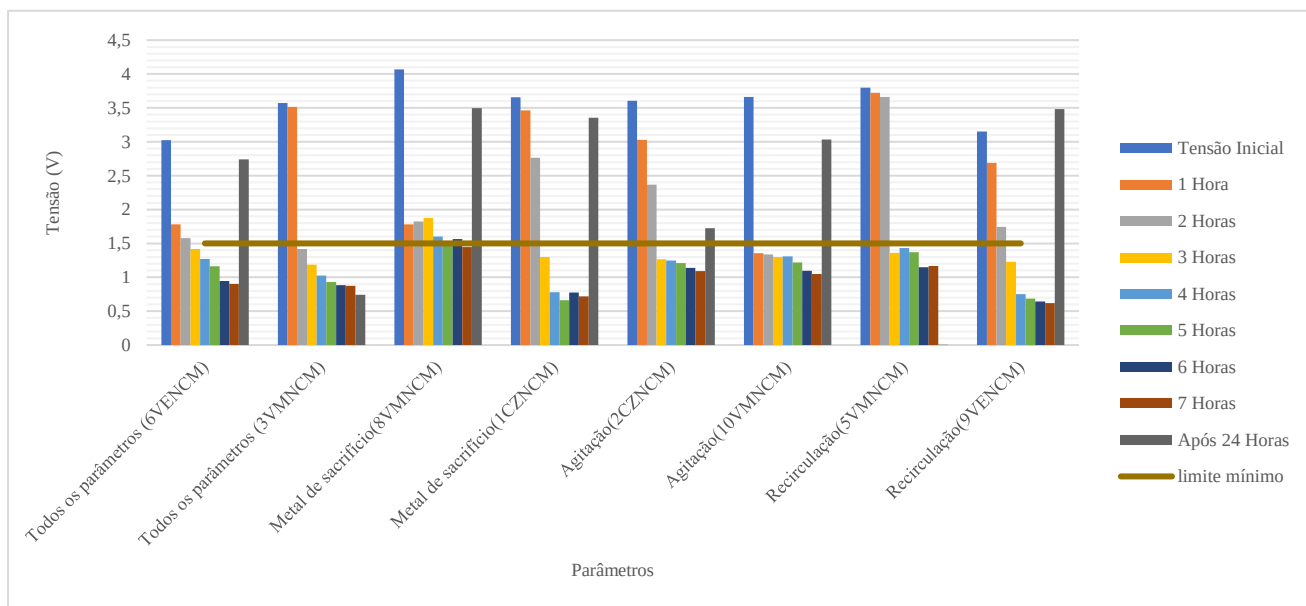
**Tabela 6** — Resultados da 2ª Rodada de experimentos com  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  com concentração de 1,5 mol/L.

| <b>Experimento 5 - <math>\text{Na}_2\text{SO}_4</math> - Todos os parâmetros - células: 6VENCM e 3VMNCM</b> |        |         |         |         |         |         |         |               |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------------|
| Valores de tensão em (V)                                                                                    |        |         |         |         |         |         |         |               |
| Tensão Inicial                                                                                              | 1 Hora | 2 Horas | 3 Horas | 4 Horas | 5 Horas | 6 Horas | 7 Horas | Após 24 Horas |
| 3,024                                                                                                       | 1,782  | 1,578   | 1,417   | 1,271   | 1,164   | 0,945   | 0,901   | 2,741         |
| 3,574                                                                                                       | 3,515  | 1,417   | 1,188   | 1,027   | 0,93    | 0,886   | 0,876   | 0,740         |
| <b>Experimento 6 - <math>\text{Na}_2\text{SO}_4</math>- Metal de sacrifício - células: 8VMNCM e 1CZNCM</b>  |        |         |         |         |         |         |         |               |
| Valores de tensão em (V)                                                                                    |        |         |         |         |         |         |         |               |
| Tensão Inicial                                                                                              | 1 Hora | 2 Horas | 3 Horas | 4 Horas | 5 Horas | 6 Horas | 7 Horas | Após 24 Horas |
| 4,066                                                                                                       | 1,782  | 1,826   | 1,875   | 1,602   | 1,49    | 1,563   | 1,446   | 3,495         |
| 3,657                                                                                                       | 3,462  | 2,766   | 1,3     | 0,779   | 0,662   | 0,774   | 0,716   | 3,354         |
| <b>Experimento 7 - <math>\text{Na}_2\text{SO}_4</math>- Agitação - células: 2CVNCM e 10VMNCM</b>            |        |         |         |         |         |         |         |               |
| Valores de tensão em (V)                                                                                    |        |         |         |         |         |         |         |               |
| Tensão Inicial                                                                                              | 1 Hora | 2 Horas | 3 Horas | 4 Horas | 5 Horas | 6 Horas | 7 Horas | Após 24 Horas |
| 3,603                                                                                                       | 3,029  | 2,366   | 1,266   | 1,246   | 1,212   | 1,139   | 1,091   | 1,726         |
| 3,661                                                                                                       | 1,358  | 1,339   | 1,300   | 1,310   | 1,217   | 1,096   | 1,047   | 3,032         |
| <b>Experimento 8 - <math>\text{Na}_2\text{SO}_4</math>- Recirculação - canais: 5VMNCM e 9VENCM</b>          |        |         |         |         |         |         |         |               |
| Valores de tensão em (V)                                                                                    |        |         |         |         |         |         |         |               |
| Tensão Inicial                                                                                              | 1 Hora | 2 Horas | 3 Horas | 4 Horas | 5 Horas | 6 Horas | 7 Horas | Após 24 Horas |
| 3,798                                                                                                       | 3,725  | 3,661   | 1,363   | 1,431   | 1,368   | 1,149   | 1,169   | 0,003         |
| 3,150                                                                                                       | 2,688  | 1,743   | 1,227   | 0,750   | 0,687   | 0,643   | 0,618   | 3,480         |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Observando os resultados finais, ou seja, a tensão após 24 horas, é notável que somente os experimentos 5 e 8 tiveram replicas em que valores abaixo do limite de tensão foram obtidos valores abaixo do limite mínimo de tensão.

Assim como nos experimentos 1 a 4 da segunda rodada, é possível observar que houve uma queda significativa na tensão inicial após 3 horas com a agitação como único fator de influência.

**Figura 8** — Experimentos 5 a 8 da segunda rodada utilizando  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Fonte: Elaborada pelo autor.

No quarto experimento, conforme a Figura 8, o experimento 8 apresentou boa resposta, após 24 horas sua tensão caiu bem abaixo do limite mínimo o que sugere que houve um rompimento do dispositivo interno da célula que permite a medida de tensão. As outras baterias recarregaram espontaneamente quase por completo.

Conforme observado na Figura 8, as baterias demonstraram bom desempenho durante a reação. Contudo, após a lavagem, recarregaram espontaneamente e, após 24 horas, todas as tensões aumentaram se aproximando do valor inicial, não havendo nenhuma bateria com tensão abaixo do limite mínimo. Nos experimentos da segunda rodada, apresentados na Figura 7, algumas baterias alcançaram a tensão desejada enquanto em solução, mas após a última medição, a menor tensão foi de 1,726 V no experimento 7, acima do limite mínimo. Portanto, o fabricante e as especificações químicas das baterias não se mostraram fatores relevantes, já que todas apresentaram uma tensão acima do valor limite definido.

No quarto experimento, conforme Figura 8, o experimento 8 apresentou a resposta, após 24 horas sua tensão caiu bem abaixo do limite mínimo o que sugere que houve um rompimento do dispositivo interno da célula que permite a medida de tensão. As outras baterias recarregaram espontaneamente quase por completo.

### 4.2.3. 3ª Rodada de Experimentos

A Tabela 7 apresenta uma tabela com a identificação das baterias, sal, molaridade e fatores de influência para cada experimento

**Tabela 7** — Especificações e células submetidas a imersão para os experimentos da terceira rodada.

| Experimento | Identificação | Solução             | Molaridade | Fatores de influência |
|-------------|---------------|---------------------|------------|-----------------------|
| 1           | 11VMNCM       | Na2SO4              | 1,0 mol/L  | Agitação magnética    |
| 2           | 4VENCM        |                     |            | Recirculação          |
| 3           | 10VMNCM       |                     |            | Todos os fatores      |
| 4           | 6VENCM        |                     |            | Metal de sacrifício   |
| 5           | 1CZNCM        |                     | 1,5 mol/L  | Agitação magnética    |
| 6           | 5VENCM        | Metal de sacrifício |            |                       |
| 7           | 3VENCM        | MgSO4.7H2O          | 0,5 mol/L  | Agitação magnética    |
| 8           | 7VMNCM        |                     |            | Todos os fatores      |
| 9           | 4VMNCM        |                     |            | Metal de sacrifício   |
| 10          | 1VCNCM        |                     | 1,0 mol/L  | Recirculação          |

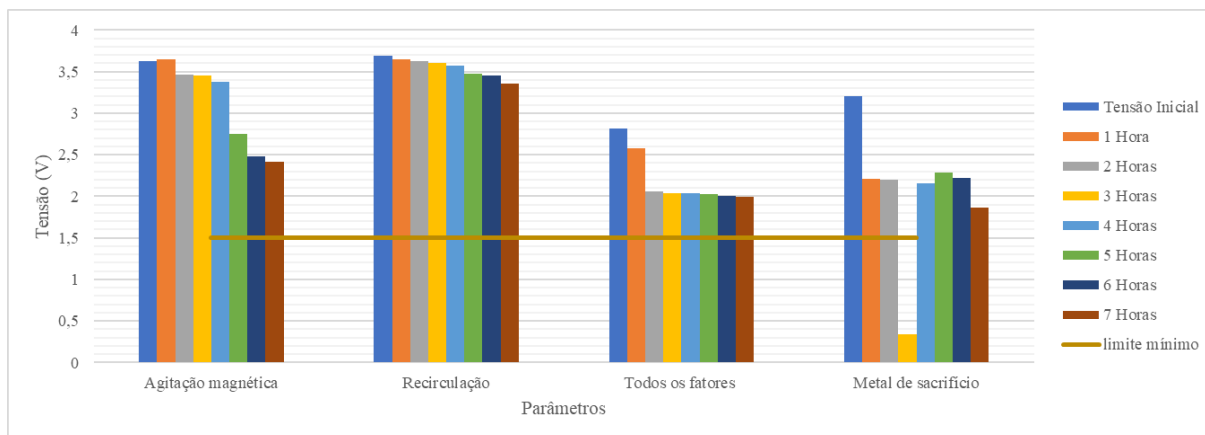
Fonte: Elaborada pelo autor.

Para uma análise mais objetiva, os gráficos e tabelas que apresentarão as tensões ao longo das horas serão divididos por sal e concentração, dando foco nos fatores de influência e concentrações, a Tabela 8 apresenta os dados para o sal sulfato de sódio Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, onde é possível verificar que com concentração de 1,5 mol/L, as células apresentaram tensões abaixo do limite mínimo.

**Tabela 8** — Experimentos 1 a 6 da terceira rodada utilizando Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - 1,0 mol/L |                     |         |                          |        |         |         |         |         |         |         |
|---------------------------------------------|---------------------|---------|--------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Ensaio                                      | Fator de Influência | Célula  | Valores de tensão em (V) |        |         |         |         |         |         |         |
|                                             |                     |         | Tensão Inicial           | 1 Hora | 2 Horas | 3 Horas | 4 Horas | 5 Horas | 6 Horas | 7 Horas |
| 1                                           | Agitação magnética  | 11VMNCM | 3,63                     | 3,647  | 3,467   | 3,452   | 3,379   | 2,751   | 2,483   | 2,41    |
| 2                                           | Recirculação        | 4VENCM  | 3,69                     | 3,647  | 3,625   | 3,601   | 3,572   | 3,478   | 3,45    | 3,358   |
| 3                                           | Todos os fatores    | 10VMNCM | 2,81                     | 2,576  | 2,06    | 2,04    | 2,035   | 2,021   | 2,006   | 1,991   |
| 4                                           | Metal de sacrifício | 6VENCM  | 3,203                    | 2,205  | 2,196   | 0,338   | 2,16    | 2,289   | 2,22    | 1,863   |
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - 1,5 mol/L |                     |         |                          |        |         |         |         |         |         |         |
| Ensaio                                      | Fator de Influência | Célula  | Valores de tensão em (V) |        |         |         |         |         |         |         |
|                                             |                     |         | Tensão Inicial           | 1 Hora | 2 Horas | 3 Horas | 4 Horas | 5 Horas | 6 Horas | 7 Horas |
| 5                                           | Agitação magnética  | 1CZNCM  | 3,661                    | 1,358  | 1,339   | 1,3     | 1,31    | 1,217   | 1,096   | 1,047   |
| 6                                           | Metal de sacrifício | 5VENCM  | 4,066                    | 1,782  | 1,826   | 1,875   | 1,602   | 1,49    | 1,563   | 1,446   |

Fonte: Elaborada pelo autor.

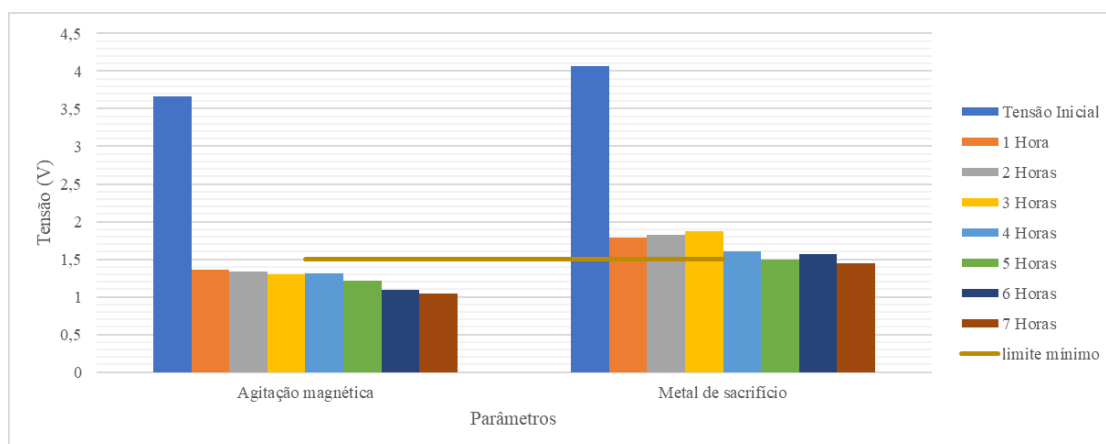
**Figura 9** — Experimentos 1 a 4 da terceira rodada utilizando  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Fonte: Elaborada pelo autor.

Após analisar as medidas apresentadas na Tabela 8 e na Figura 9, observa-se que, para a solução salina de sulfato de sódio com concentração de 1,0 mol/L, o fator de influência que obteve o melhor resultado na descarga das baterias foi o uso de metal de sacrifício, resultando na menor tensão de 1,863 V ao final do experimento.

Durante a terceira hora do experimento, no experimento com o uso do metal de sacrifício, houve uma queda significativa na tensão no Experimento 4, atribuída a um erro de leitura, pois as medições posteriores mostram a tensão seguindo um fluxo normal de descarga. Os dados indicam que não há uma queda significativa de tensão entre o uso do metal de sacrifício isoladamente e a combinação de todos os fatores.

Para os resultados com sulfato de sódio na concentração de 1,5 mol/L, apresentados na Figura 10, o melhor fator de influência, resultando na menor tensão ao final do experimento, foi a combinação de todos os fatores. Nesse caso, todos os fatores apresentaram uma queda significativa na tensão, com uma faixa de valores próxima na última hora de experimento.

**Figura 10** — Experimentos 5 a 6 da terceira rodada utilizando  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Fonte: Elaborada pelo autor.

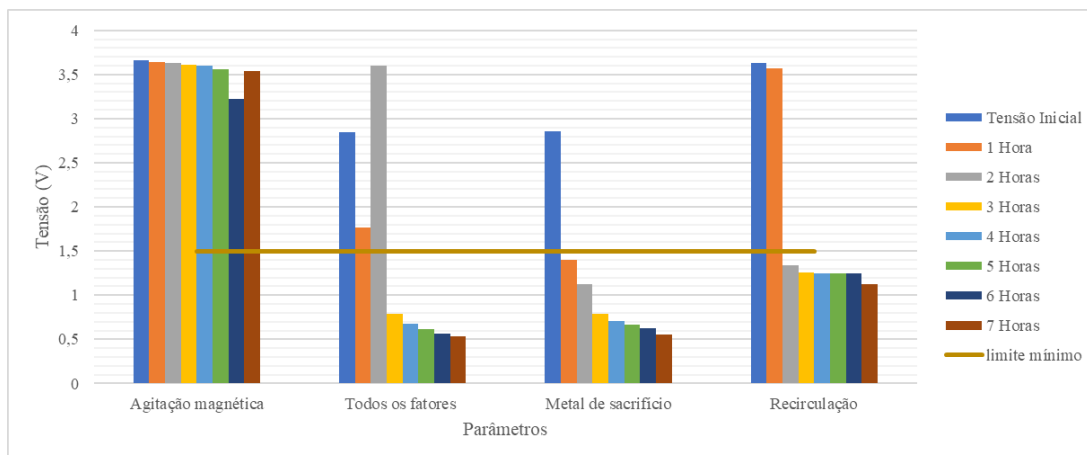
Finalizando a terceira rodada de experimentos na Tabela 9 estão apresentados os resultados para o sal sulfato de magnésio heptahidratado  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .

**Tabela 9** — Experimentos 7 a 10 da terceira rodada utilizando  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  com concentração variada.

| <b><math>\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}</math> - 0,5 mol/L</b> |                     |               |                          |        |         |         |         |         |         |         |
|-------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------|--------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Experimento                                                             | Fator de Influência | Identificação | Valores de tensão em (V) |        |         |         |         |         |         |         |
|                                                                         |                     |               | Tensão Inicial           | 1 Hora | 2 Horas | 3 Horas | 4 Horas | 5 Horas | 6 Horas | 7 Horas |
| 7                                                                       | Agitação magnética  | 3VENCM        | 3,663                    | 3,64   | 3,631   | 3,613   | 3,604   | 3,561   | 3,226   | 3,536   |
| 8                                                                       | Todos os fatores    | 7VMNCM        | 2,851                    | 1,767  | 3,596   | 0,784   | 0,672   | 0,613   | 0,565   | 0,531   |
| 9                                                                       | Metal de sacrifício | 4VMNCM        | 2,853                    | 1,402  | 1,125   | 0,789   | 0,706   | 0,662   | 0,623   | 0,559   |
| <b><math>\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}</math> - 1,0 mol/L</b> |                     |               |                          |        |         |         |         |         |         |         |
| Experimento                                                             | Fator de Influência | Identificação | Valores de tensão em (V) |        |         |         |         |         |         |         |
|                                                                         |                     |               | Tensão Inicial           | 1 Hora | 2 Horas | 3 Horas | 4 Horas | 5 Horas | 6 Horas | 7 Horas |
| 10                                                                      | Recirculação        | 1VCNCM        | 3,627                    | 3,574  | 1,339   | 1,256   | 1,246   | 1,242   | 1,246   | 1,125   |

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Figura 11** — Experimentos 7 a 10 da terceira rodada utilizando  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .



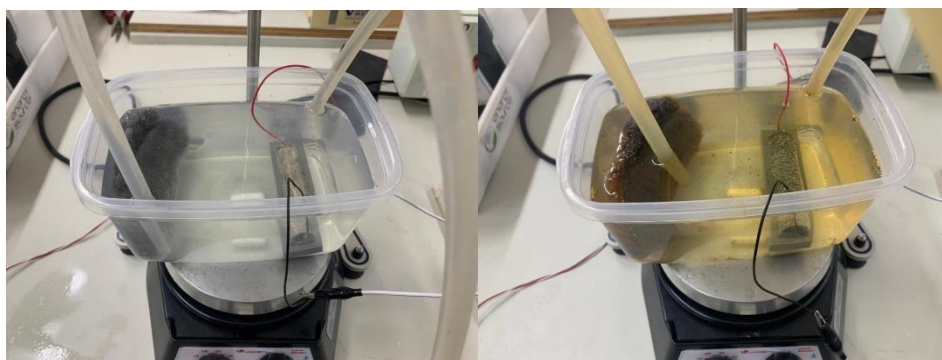
Fonte: Elaborada pelo autor.

Estudando os dados apresentados na Figura 11, infere-se que o melhor resultado, isto é, a menor tensão após as horas de experimento, foi alcançado utilizando todos os fatores de influência em conjunto. Para o sulfato de magnésio com uma concentração de 0,5 mol/L, observa-se uma grande diferença entre as tensões obtidas com o uso do metal de sacrifício e a combinação de todos os fatores, em comparação com os fatores de agitação e recirculação. Assim, o metal de sacrifício também demonstrou boa compatibilidade nas descargas das baterias NMC.

Neste caso, o fator que mais influenciou significativamente na descarga das células foi a recirculação, que resultou na menor tensão e apresentou um *gap* considerável em relação aos outros fatores. Ao longo do tempo do experimento, utilizando todos os fatores em conjunto, foi possível observar que a coloração da solução adquiriu um tom amarronzado. O principal fator para isso foi a utilização do metal de sacrifício, que, devido ao seu maior potencial de oxidação, foi oxidado pela solução salina em detrimento da oxidação da célula. Esta diferença pode ser observada na Figura 12, destacando-se pela maior discrepância entre o início e o final do experimento, enquanto nos experimentos anteriores houve apenas uma leve diferença de coloração.



**Figura 12** — Diferença da coloração da solução no experimento utilizando  $\text{MgSO}_4$  – 1,0 Mol/L.



Fonte: Elaborada pelo autor.

## 5. CONCLUSÕES

O estudo envolveu a análise detalhada do processo de descarga de LIBs, desde a revisão bibliográfica sistemática, que guiou a escolha dos sais utilizados, até a identificação dos fatores de influência, como agitação magnética, recirculação e metal de sacrifício.

A primeira rodada de experimentos mostrou que o sulfato de sódio foi o sal mais eficiente, porque após 24 horas, foram obtidas 3 células com valores de tensão menores que a tensão inicial, porém não atingiram o limite mínimo. Para o sulfato de magnésio, houve um comportamento aceitável, sendo a menor tensão, 0,749 V, atingida durante o experimento utilizando todos os parâmetros. Portanto os primeiros resultados foram satisfatórios, considerando assim estudos aprofundados para compreender otimizações no experimento a fim de obter resultados abaixo de 1,5 V.

Na segunda rodada de experimentos, o sulfato de sódio também apresentou melhores resultados, com várias baterias apresentando redução de voltagem, como a 6VENCM utilizando todos os fatores de influência, 2CZNCM utilizando somente agitação e também 3VMNCM utilizando todos os fatores de influência e 5VMNCM utilizando recirculação com menos de 1,5 V, sugerindo que um tempo de submersão maior poderia melhorar ainda mais os resultados.

De maneira geral, para a terceira rodada o sulfato de sódio foi o melhor sal utilizado, com a maioria das baterias caindo para 2,0 V ou menos na última medida. Os fatores de influência variaram e a marca das baterias não foi muito relevante. O sulfato de magnésio com concentração de 0,5 M foi o que mais corroeu os polos das baterias, deixando a solução com uma coloração esverdeada observada. A metodologia proposta mostrou-se adequada para o descarregamento das tensões residuais das baterias por meio de submersão em soluções salinas, contribuindo para um ciclo de vida sustentável das baterias de íon-lítio (LIBs).

Comparando os valores de descarga entre os dois sais, o sulfato de sódio apresentou maior variação nos valores finais das tensões, indicando uma discrepância na utilização dos fatores de influência, enquanto o sulfato de magnésio mostrou uma faixa de valores mais estável.

Em termos de contribuições teóricas, este estudo enriquece a subárea de pesquisa relacionada ao descarregamento de baterias, fornecendo uma compreensão mais profunda dos impactos de diferentes sais e fatores de influência na eficiência da descarga residual.

Praticamente, os resultados obtidos têm grande relevância para a reciclagem das LIBs, propondo um método que pode ser aplicado em larga escala, promovendo uma sustentabilidade nos processos de reciclagem, especialmente para empresas que utilizam essas baterias.

Outro ponto importante, a corrosão observada nos polos das baterias com o uso do sulfato de magnésio em concentração de 1,0 M indica que o controle de concentração é um fator crítico a ser considerado

Para pesquisas futuras, recomenda-se a exploração de novas concentrações e tipos de sais, bem como a investigação de outros fatores, como uma agitação magnética mais rápida, que poderiam melhorar ainda mais a eficiência do processo. A continuidade deste estudo poderá trazer avanços significativos para o fim do ciclo de vida das LIBs, beneficiando não apenas as empresas, mas também gerando um impacto positivo para a sociedade como um todo. O sistema de monitoramento das descargas funcionou de maneira eficiente, com menor corrosão e melhor estabilidade.

Em suma, o projeto foi concluído com êxito. Há várias possibilidades para novos projetos, incluindo a exploração de novas concentrações, novos sais ou uma agitação magnética mais rápida. O processo estudado contribui de forma significativa para o fim do ciclo de vida das LIBs, beneficiando a economia circular das empresas que utilizam essas baterias e gerando um impacto positivo para a sociedade.

## 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, 2007. DOI: <https://doi.org/10.31514/rliberato.2007v8n9.p9>.

BGR - *BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE. Lithium – Umfassende Informationen zur Ressource zur Versorgungssituation und zur Nachfrage*. Disponível em: <https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Rohstoffe/Downloads/Lithium.pdf>. Acesso em: 07 ago. 2024.

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

BRASIL. Decreto nº 10.388, de 6 de junho de 2020. Diário Oficial da União, Brasília, 2020.

BRASIL. Decreto nº 11.237, de 11 de janeiro de 2022. Diário Oficial da União, Brasília, 2022.

BRADLEY, D. C.; STILLINGS, L. L.; JASKULA, B. W.; MUNK, L. A.; McCAULEY, A. D. Lithium. In: SCHULZ, K. J.; DEYOUNG, J. H. Jr.; SEAL, R. R. II; BRADLEY, D. C. *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>.

CASTRO, F. D.; MEHNER, E.; CUTAIA, L.; VACCARI, M. *Life cycle assessment of an innovative lithium-ion battery recycling route: A feasibility study. Journal of Cleaner Production*, v. 368, 25 set. 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. Porto Alegre: Grupo de Engenharia Integrada (EI2)/Escola de Engenharia de São Carlos USP, 2011.

DIRETIVA 2012/19/EU do Parlamento Europeu e do Conselho, de 4 de junho de 2012, sobre Resíduos eletroeletrônicos (WEEE), 2012.

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.

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>.

HAGE, D. S.; CARR, J. D. Química Analítica e Análise Quantitativa. 1. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2012.

HOSSAIN, M. Y.; LIANG, Y.; PERVEZ, M. N.; YE, X.; DONG, X.; HASSAN, M. M.; CAI, Y. *Effluent-free deep dyeing of cotton fabric with cacao husk extracts using the Taguchi optimization method. Cellulose*, v. 28, p. 517–532, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03525-8>.

JIN, Y.; LI, S.; YANG, J. *Silicon-based materials for lithium-ion batteries: The promise and the challenges. Frontiers in Chemistry*, v. 8, p. 569, 2020. DOI: 10.3389/fchem.2020.00569.

LEE, H.; KIM, J.; PARK, J. *Thermal and Mechanical Safety of Lithium-Ion Batteries: A Review. Journal of Power Sources*, v. 284, p. 159–170, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.10.017>.

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.202000781>

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>

LI, J.; WANG, G.; XU, Z. *Generation and detection of metal ions and volatile organic compounds (VOCs) emissions from the pretreatment processes for recycling spent lithium-ion batteries. Waste Management*, v. 52, p. 221–227, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.011>.

MARTINS, C. R.; PASSOS, L. A.; ANDRADE, M. E. C. T.; SCAVAZZANI, N.; SANTOS, M. P.; CARDOZO FILHO, L.; GARDE, I. A. A.; PENCHEL, R. A.; OLIVEIRA, J. A. Descarga elétrica da energia residual de baterias de íon lítio visando sua reciclagem. In: Congresso Brasileiro sobre Gestão do Ciclo de Vida, 2021, Porto Alegre. Anais do VII Congresso Brasileiro sobre Gestão do Ciclo de Vida, v. II, p. 196–202, 2021.

MAYYAS, A.; STEWARD, D.; MANN, M. *The case for recycling: Overview and challenges in the material supply chain for automotive li-on batteries. Sustainable Materials and Technologies*, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2018.e00087>.

MONTGOMERY, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. 10. ed. Wiley, 2019.

MURRAY, P. M.; BELLANY, F.; BENHAMOU, L.; BUČAR, D. K.; TABOR, A. B.; SHEPPARD, T. D. *The application of design of experiments (DoE) reaction optimisation and solvent selection in the development of new synthetic chemistry. Org. Biomol. Chem.*, v. 14, p. 2373, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1039/C5OB01892G>.

OJANEN, S.; LUNDSTRÖM, M.; SANTASALO-AARNIO, A.; SERNA-GUERRERO, R. *Challenging the concept of electrochemical discharge using salt solutions for lithium-ion batteries recycling. Waste Management*, v. 76, p. 242–249, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.03.045>.

ResearchGate. (2024). Overview of a LIB cell discharge configuration. Disponível em: [https://www.researchgate.net/figure/Overview-of-a-LIB-cell-discharge-configuration\\_fig1\\_362435370](https://www.researchgate.net/figure/Overview-of-a-LIB-cell-discharge-configuration_fig1_362435370). Acesso em: 15 ago. 2024.

SHAW-STEWART, J.; ALVAREZ-REGUERA, A.; GRESZTA, A.; MARCO, J.; MASSOD, M.; SOMMERVILLE, R.; KENDRICK, E. *Aqueous solution discharge of cylindrical lithium-ion cells*. *Sustainable Materials and Technologies*, v. 22, e00110, 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>.

TIAN, G.; YUAN, G.; ALEKSANDROV, A.; ZHANG, T.; LI, Z.; FATHOLLAHI-FARD, A. M.; IVANOV, M. *Recycling of spent Lithium-ion Batteries: A comprehensive review for identification of main challenges and future research trends*. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 53, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102447>.

XIAO, J.; GUO, J.; ZHAN, L.; XU, Z. *A cleaner approach to the discharge process of spent lithium-ion batteries in different solutions*. *Journal of Cleaner Production*, v. 255, maio, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120064>.

YAO, L. P.; ZENG, Q.; QI, T.; LI, J. *An environmentally friendly discharge technology to pretreat spent lithium-ion batteries*. *Journal of Cleaner Production*, v. 245, n. 118820, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118820>.

ZHANG, T.; HE, Y.; GE, L.; FU, R.; ZHANG, X.; HUANG, Y. *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>.

ZHENG, J.; YAN, P.; ESTEVEZ, L.; ZHANG, J. G. *Ni-rich layered oxide cathodes for lithium-ion batteries: Challenges and opportunities. Materials Today*, v. 48, p. 2-10, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.02.002>



**APÊNDICE A – Palavras-chave**

Quadro abaixo contém as palavras-chave que foram usadas para a o processo buscas dos artigos para a revisão bibliográfica.

|                        |                                 |
|------------------------|---------------------------------|
| Lithium-ion battery    | Recycling                       |
| Battery recycling      | Residual energy                 |
| End-of-life battery    | Electric discharge              |
| Waste treatment        | Systematic bibliographic review |
| Waste management       | Environmental management        |
| End-of-life strategies | Disposal of batteries           |

Fonte: Elaborada pelo autor.

## APÊNDICE B – Especificações das LIBs

Tabela abaixo contém as informações das baterias do tipo NMC utilizadas nos experimentos, contendo suas especificações químicas e gerais.

| LIBs Diversas |               |              |                 |             |                                    |                                                                                        | Especificações Químicas                                                                                                     | Tensão Residual | Limites de tensão |
|---------------|---------------|--------------|-----------------|-------------|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------|
| N             | Identificação | Cor          | Cor do Isolante | Fabricantes | Código de Série                    | Especificações Iniciais                                                                |                                                                                                                             |                 |                   |
| 1             | 1VNCM         | Verde Escuro | Branco          | Samsung     | ICR18650 22F SDI 1D62              | Bateria Samsung 22F 18650, 2200mAh, 4,4A, 3,6 V, íon de lítio de grau A (ICR18650-22F) | Abreviatura química: NMC<br>Cátodo: LiNiMnCoO2<br>Ânodo: carbono 11 Observações:<br>Co / Ni / Mn cátodo / proporção:<br>NCM | 3,749V          | 4,20V~2,75V       |
| 2             | 2VNCM         | Verde Escuro | Branco          | Samsung     | ICR18650 - 22F SDI 1D45            | Bateria Samsung 22F 18650, 2200mAh, 4,4A, 3,6 V, íon de lítio de grau A (ICR18650-22F) |                                                                                                                             | 3,632V          | 4,20V~2,75V       |
| 3             | 3VNCM         | Verde Escuro | Branco          | Samsung     | ICR18650 - 22F SDI 1D43            | Bateria Samsung 22F 18650, 2200mAh, 4,4A, 3,6 V, íon de lítio de grau A (ICR18650-22F) |                                                                                                                             | 3,619V          | 4,20V~2,75V       |
| 4             | 4VNCM         | Verde Escuro | Branco          | Samsung     | ICR18650 - 22F SDI 1E51            | Bateria Samsung 22F 18650, 2200mAh, 4,4A, 3,6 V, íon de lítio de grau A (ICR18650-22F) |                                                                                                                             | 3,632V          | 4,20V~2,75V       |
| 5             | 5VNCM         | Verde Escuro | Branco          | Samsung     | ICR18650 - 22F SDI 1D54            | Bateria Samsung 22F 18650, 2200mAh, 4,4A, 3,6 V, íon de lítio de grau A (ICR18650-22F) |                                                                                                                             | 3,377V          | 4,20V~2,75V       |
| 6             | 6VNCM         | Verde Escuro | Branco          | Samsung     | ICR18650 - 22F SDI 1D62            | Bateria Samsung 22F 18650, 2200mAh, 4,4A, 3,6 V, íon de lítio de grau A (ICR18650-22F) |                                                                                                                             | 3,006V          | 4,20V~2,75V       |
| 7             | 7VNCM         | Verde Escuro | Branco          | Samsung     | ICR18650 - 22F SDI 1D62            | Bateria Samsung 22F 18650, 2200mAh, 4,4A, 3,6 V, íon de lítio de grau A (ICR18650-22F) |                                                                                                                             | 3,619V          | 4,20V~2,75V       |
| 8             | 8VNCM         | Verde Escuro | Branco          | Samsung     | ICR18650 - 22F SDI 1D31            | Bateria Samsung 22F 18650, 2200mAh, 4,4A, 3,6 V, íon de lítio de grau A (ICR18650-22F) |                                                                                                                             | 3,652V          | 4,20V~2,75V       |
| 9             | 9VNCM         | Verde Escuro | Branco          | Samsung     | ICR18650 - 22F SDI 1D45            | Bateria Samsung 22F 18650, 2200mAh, 4,4A, 3,6 V, íon de lítio de grau A (ICR18650-22F) |                                                                                                                             | 3,528V          | 4,20V~2,75V       |
| 10            | 1VMNCM        | Vermelho     | Rosa            | Sanyo       | UR18650 AA 552A                    | Bateria Sanyo AA 18650, 2150mAh, 4,3A, 3,6V, íon de lítio grau A (UR18650AA)           | Abreviatura química: NMC<br>Cátodo: LiNiMnCoO2<br>Ânodo: carbono                                                            | 3,625V          | 4,20V~3,00V       |
| 11            | 2VMNCM        | Vermelho     | Rosa            | Sanyo       | UR18650 AA U14A                    | Bateria Sanyo AA 18650, 2150mAh, 4,3A, 3,6V, íon de lítio grau A (UR18650AA)           |                                                                                                                             | 3,692V          | 4,20V~3,00V       |
| 12            | 3VMNCM        | Vermelho     | Rosa            | Sanyo       | UR18650 AA T0ZA                    | Bateria Sanyo AA 18650, 2150mAh, 4,3A, 3,6V, íon de lítio grau A (UR18650AA)           |                                                                                                                             | 3,561V          | 4,20V~3,00V       |
| 13            | 4VMNCM        | Vermelho     | Cinza           | Sanyo       | UR18650 E R02C                     | Bateria Sanyo E 18650, 2000mAh, 6A, 3,6V, íon de lítio grau A (UR18650E)               |                                                                                                                             | 3,615V          | 4,20V~2,75V       |
| 14            | 5VMNCM        | Vermelho     | Branco          | Sanyo       | UR18650A R45A                      | Bateria Sanyo A 18650, 2150mAh, 8,6A, 3,6 V, íon de lítio grau A (UR18650A)            |                                                                                                                             | 3,784V          | 4,20V~2,75V       |
| 15            | 6VMNCM        | Vermelho     | Vermelho        | Sanyo       | IDOFJT4 045567                     | Não foram encontradas informações sobre as especificações básicas.                     |                                                                                                                             | 3,841V          | 4,20V~2,75V       |
| 16            | 7VMNCM        | Vermelho     | Branco          | Sanyo       | UR18650A R45A                      | Bateria Sanyo A 18650, 2150mAh, 8,6A, 3,6 V, íon de lítio grau A (UR18650A)            |                                                                                                                             | 3,848V          | 4,20V~2,75V       |
| 17            | 8VMNCM        | Vermelho     | Branco          | Sanyo       | UR18650A R22A                      | Bateria Sanyo A 18650, 2150mAh, 8,6A, 3,6 V, íon de lítio grau A (UR18650A)            |                                                                                                                             | 4,042V          | 4,20V~2,75V       |
| 18            | 9VMNCM        | Vermelho     | Branco          | Sanyo       | UR18650A R45A                      | Bateria Sanyo A 18650, 2150mAh, 8,6A, 3,6 V, íon de lítio grau A (UR18650A)            |                                                                                                                             | 3,863V          | 4,20V~2,75V       |
| 19            | 10VMNCM       | Vermelho     | Rosa            | Sanyo       | UR18650 AA 346A                    | Bateria Sanyo AA 18650, 2150mAh, 4,3A, 3,6V, íon de lítio grau A (UR18650AA)           |                                                                                                                             | 3,633V          | 4,20V~3,00V       |
| 20            | 11VMNCM       | Vermelho     | Branco          | Sanyo       | UR18650A R45A                      | Bateria Sanyo A 18650, 2150mAh, 8,6A, 3,6 V, íon de lítio grau A (UR18650A)            |                                                                                                                             | 3,873V          | 4,20V~2,75V       |
| 21            | 12VMNCM       | Vermelho     | Branco          | Sanyo       | UR18650A R45A                      | Bateria Sanyo A 18650, 2150mAh, 8,6A, 3,6 V, íon de lítio grau A (UR18650A)            |                                                                                                                             | 3,813V          | 4,20V~2,75V       |
| 22            | 13VMNCM       | Vermelho     | Rosa            | Sanyo       | UR18650AA 352A                     | Bateria Sanyo AA 18650, 2150mAh, 4,3A, 3,6V, íon de lítio grau A (UR18650AA)           |                                                                                                                             | 3,649V          | 4,20V~3,00V       |
| 23            | 1CZNCM        | Cinza        | Azul            | Sinowatt    | SW18650 - 30MP 18F02AS 248469      | Bateria Sinowatt SW18650, 2600mAh, 3,60V.                                              |                                                                                                                             | 3,635V          | 4,20V~2,50V       |
| 24            | 2CZNCM        | Cinza        | Branco          | Lishen      | LS LR1865SE CPO488 00152235        | Bateria Lishen LR1865SF, 2200mAh, 4,3A, 3,7V.                                          | 3,610V                                                                                                                      | 4,20V~3,00V     |                   |
| 25            | 3CZNCM        | Cinza        | Azul            | Sinowatt    | SW18650-30MP 19A12AS 030008        | Bateria Sinowatt SW18650, 2600mAh, 3,60V.                                              | 3,663V                                                                                                                      | 4,20V~3,00V     |                   |
| 26            | 4CZNCM        | Cinza        | Azul            | Sinowatt    | SW18650-30MP 18F08AS 093660        | Bateria Sinowatt SW18650, 2600mAh, 3,60V.                                              | 3,672V                                                                                                                      | 4,20V~3,00V     |                   |
| 27            | 5CZNCM        | Cinza        | Branco          | Lishen      | LS LR18655F A50488 00025038        | Bateria Lishen LR1865SF, 2200mAh, 4,3A, 3,7V.                                          | 3,690V                                                                                                                      | 4,20V~3,00V     |                   |
| 28            | 1ACNCM        | Azul Claro   | Verde           | EVE         | Não foi encontrado código de série | Não foram encontradas informações sobre as especificações básicas.                     | 3,237V                                                                                                                      | 4,20V~3,00V     |                   |
| 29            | 2ACNCM        | Azul Claro   | Branco          | Samsung     |                                    |                                                                                        | 3,203V                                                                                                                      | 4,20V~3,00V     |                   |
| 30            | 1VCNCM        | Verde Claro  | Branco          | BAK         |                                    |                                                                                        | 3,717V                                                                                                                      | 4,20V~2,50V     |                   |

Fonte: Elaborada pelo autor.

