

GERAÇÃO DO BANCO DE DADOS DO PROCESSO DE RECICLAGEM DE PILHAS E BATERIAS E MODELAGEM DO PROCESSO DE DESCARGAElias MAGALHÃES¹ (IC), Letícia F. TURETTA² (PQ)¹Universidade Federal de Itajubá, ²Instituto de Recursos Naturais**Palavras-chave:** Análise estatística, Íons de lítio e Solução salina.**Introdução**

Desde as pesquisas iniciais em laboratório na década de 1970 e posterior inserção no mercado pela Sony, em um modelo mais avançado e com maior densidade energética, as baterias de íons de lítio passaram a ser amplamente utilizadas em diversos dispositivos eletrônicos do cotidiano, desde equipamentos hospitalares até veículos elétricos rápido crescimento desse mercado e a ampla gama de aplicações resultaram em um aumento expressivo no descarte dessas baterias, o que impulsionou a busca por métodos industriais de reciclagem (Kim et al., 2019).

Embora se esperasse que as tecnologias de reciclagem dessas baterias evoluíssem a um ritmo semelhante ao das baterias de chumbo-ácido, o avanço tem sido mais lento e a sustentabilidade do processo é prejudicada frente a desafios como: custo operacional, volatilidade do preço dos metais e as políticas públicas que incentivam o processo de recuperação dessas pilhas e baterias.

Custo operacional

Diferentes fabricantes produzem baterias com variações de formato, tamanho e composição química, tornando o processo automatizado mais complexo. Além disso, a escolha do composto final de maior interesse na reciclagem exige adaptações no processo. Por exemplo, em uma bateria NMC (subcategoria das baterias de íons de lítio) 1:1:1 (níquel, manganês e cobalto em proporções iguais), a recuperação de metais pode ser balanceada, enquanto em uma NMC 8:1:1 (com alto teor de níquel), é necessário utilizar um separador de níquel mais eficiente (Baum et al., 2022). Em vista dessa problemática, surge o desafio de manter as operações unitárias de separação em uma boa faixa de operação, de forma que o equipamento não opere sob ou sobre sua capacidade.

Políticas públicas

A falta de políticas públicas estruturadas e de incentivos fiscais também tem sido um obstáculo para a expansão da reciclagem de baterias de íon de lítio. Em contraste com as baterias de chumbo-ácido, que possuem

regulamentações bem definidas e uma cadeia de reciclagem consolidada, as baterias de lítio carecem de diretrizes claras e subsídios (Ramasubramanian et al., 2024).

Volatilidade do preço dos metais

Outro fator limitante na escalabilidade da reciclagem dessas baterias, é a constante variação no preço dos metais que podem ser obtidos a partir da reciclagem, como o lítio (Li), níquel (Ni) e cobalto (Co), conforme o Figura 1.



Figura 1 – Valor dos metais no mercado global (em Yuan chinês).

Fonte: Tradingeconomics (2025).

Ainda que a reciclagem seja demasiada complexa e inviável no cenário atual, existem três diferentes rotas de processamento empregadas hoje, sendo elas: hidrometalurgia, pirometalurgia e reciclagem direta. Independentemente da rota empregada, uma etapa comum a todos os processos de reciclagem é a descarga prévia da bateria, etapa de segurança fundamental para evitar o risco explosão durante o manuseio. Nesse contexto, faz-se necessário compreender a descarga dessas baterias por imersão em solução aquosa salina e os mecanismos que podem otimizar essa operação.

Diante disso, este trabalho tem como objetivo a criação de um banco de dados acerca da descarga de baterias de íons de lítio em soluções aquosas salinas, para posterior utilização em modelagens de previsão do tempo

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

de descarga. Acredita-se que a sistematização dessas informações possa subsidiar novas pesquisas, contribuindo para a melhor compreensão dos fatores que influenciam o processo de descarga e, consequentemente, para o avanço de tecnologias mais seguras e eficientes de reciclagem.

Metodologia

O processo de reciclagem dessas baterias não é padronizado e possui variações entre diferentes empresas, principalmente no que tange às tecnologias proprietárias. No entanto, por meio da Figura 2, é possível delimitar um fluxograma geral do processo, no qual exemplifica-se as etapas mais comuns na descarga (Baum et al., 2022; Brückner; Frank; Elwert, 2020; Yao et al., 2020)

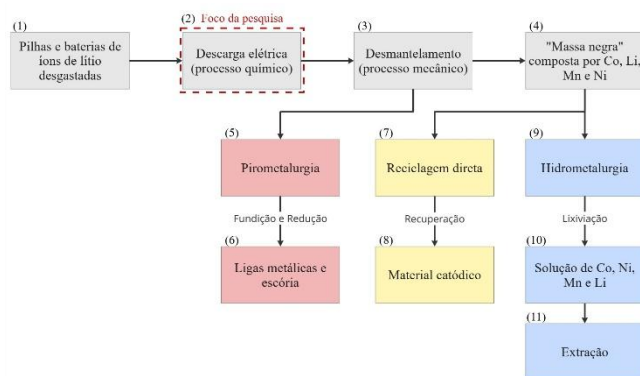


Figura 2 – Fluxograma simplificado do processo de reciclagem e suas diferentes rotas.

Fonte: Adaptado de Baum et al., 2022; Brückner, Frank, Elwert, 2020; Yao et al., 2020.

1. Pilhas e baterias de íons de lítio desgastadas: etapa inicial em que ocorre a coleta dos dispositivos ao final de sua vida útil. Em alguns casos, as células ainda podem ser destinadas para aplicações de menor exigência, como armazenamento doméstico de energia proveniente de painéis solares.

2. Descarga elétrica: consiste na descarga controlada das células por imersão em solução aquosa salina. Esse procedimento reduz gradualmente a tensão da bateria, prevenindo riscos de curto-circuito, incêndio ou explosão durante as etapas subsequentes.

3. Desmantelamento: geralmente realizado de forma manual, envolve a abertura da bateria e a separação física dos seus constituintes principais: cátodo, ânodo, eletrólito e filme separador. Apesar de essencial, esse processo é oneroso devido à elevada demanda de mão de obra.

4. Massa negra: obtida após o processamento mecânico, consiste em um pó de coloração escura rico em metais de alto valor agregado, como cobalto (Co), lítio (Li),

manganês (Mn) e níquel (Ni).

5. Pirometalurgia: rota baseada em tratamentos térmicos em altas temperaturas, como fundição e redução, visando a obtenção de ligas metálicas e escória. Embora seja um processo consolidado, apresenta elevada demanda energética.

6. Ligas metálicas e escória: produtos obtidos pela rota pirometalúrgica. As ligas metálicas podem ser reutilizadas na cadeia produtiva, enquanto a escória geralmente tem baixo valor agregado.

7. Reciclagem direta: rota emergente que busca a recuperação do material catódico sem a decomposição completa de sua estrutura cristalina, preservando a funcionalidade eletroquímica.

8. Material catódico: resultado da reciclagem direta, podendo ser reintegrado em novos dispositivos após reprocessamento adequado.

9. Hidrometalurgia: rota amplamente estudada que envolve a lixiviação da massa negra com soluções ácidas ou básicas, promovendo a dissolução seletiva dos metais presentes.

10. Solução metálica: solução resultante da lixiviação, composta principalmente por íons de cobalto, níquel, manganês e lítio, que poderão ser posteriormente separados e purificados.

11. Extração: etapa final do processo hidrometalúrgico, em que os metais presentes na solução são recuperados por múltiplas rotas.

Na etapa de descarga elétrica por imersão em solução aquosa salina, diferentes sais podem ser empregados, sendo que a eficiência do processo está fortemente associada ao tipo de ânion presente. O cloreto de sódio (NaCl) é o sal mais consolidado tanto em operações industriais quanto na literatura, em função de sua eficiência moderada aliada ao baixo custo. Entretanto, outros sais, como MnSO_4 , Na_2CO_3 , ZnSO_4 , FeSO_4 e Na_2SO_4 , também podem ser utilizados para promover a descarga (Kim et al., 2021; Wang et al., 2022; Yao et al., 2020).

A imersão apresenta como principal vantagem a possibilidade de realizar a descarga simultânea, em batelada, de células com diferentes formatos e tamanhos. Durante o processo, a tensão das células é reduzida gradativamente até alcançar valores residuais próximos de zero, sem, no entanto, atingir exatamente 0 V. Isso ocorre devido ao efeito rebote, no qual a energia da bateria se reestabelece espontaneamente, mesmo após a tensão ter caído a 0 V (Li et al., 2023; Rouhi et al., 2021), ou ainda devido à menor quantidade de íons presentes na solução, visto que, a maior massa molar da solução salina dificulta a passagem de elétrons e resulta em descargas

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

incompletas (Torabian; Jafari; Bazargan, 2022).

Além do tipo de sal, parâmetros como a concentração da solução e a intensidade de agitação influenciam diretamente na velocidade de descarga. De acordo com (Torabian; Jafari; Bazargan, 2022), a aplicação de ondas ultrassônicas pode atuar como fonte de agitação, prevenindo a sedimentação junto aos

eletrodos e acelerando o processo de descarga em até dez vezes quando comparado a condições estáticas.

Um banco de dados foi desenvolvido a partir dos artigos propostos na Tabela 1. Os dados foram aquisitados por meio de uma ferramenta de extração de dados, *WebPlotDigitizer* (Rohatgi, 2025), a partir das curvas de descarga obtidas.

Artigo	Objetivo	Soluções	Referência
Voltage behavior in lithium-ion batteries after electrochemical discharge and its implications on the safety of recycling processes	Investigar o comportamento da tensão (incluindo o rebote de tensão) após descarga eletroquímica em solução salina e suas implicações para a segurança no processamento mecânico na reciclagem.	Na_2CO_3 (5wt%) e K_2CO_3 (5wt%)	(Rouhi et al., 2021)
An environmentally friendly discharge technology to pretreat spent lithium-ion batteries	Desenvolver e avaliar uma tecnologia de descarga prévia ambientalmente amigável para baterias de íons de lítio usadas, comparando eficiência e impactos ambientais.	NaCl (0,4; 0,8 e 1,2 mol/L), FeSO_4 (0,4 e 0,8 mol/L) e MnSO_4 (0,4; 0,8 e 1,2 mol/L)	(Yao et al., 2020)
Challenging the concept of electrochemical discharge using salt solutions for lithium-ion batteries recycling	Avaliar de forma crítica a prática de descarga eletroquímica por imersão em soluções salinas, testando sua eficácia e segurança em condições reais.	NaCl (5, 10 e 20 wt%), Na_2SO_4 (5 e 10wt%), FeSO_4 (5, 10 e 20wt%) e ZnSO_4 (5, 10 e 20 wt%)	(Ojanen et al., 2018)
An effective and cleaner discharge method of spent lithium batteries	Avaliar experimentalmente diferentes soluções para descarga de baterias usadas, buscando eficiência com menor impacto ambiental.	NaCl (0,3; 0,5 e 1,0 mol/L), Na_2SO_4 (0,3; 0,5 e 1,0), Na_2CO_3 (0,3; 0,5 e 1,0 mol/L), MnSO_4 (0,3; 0,5 e 1,0 mol/L), pó de cobre e flocos de grafite	(Wang et al., 2022)

Tabela 1 – Artigos selecionados para o banco de dados.

Fonte: autoria própria (2025).

Resultados e discussão

A partir dos dados extraídos, foi realizado um tratamento prévio para a remoção de outliers, seguido de uma análise estatística com o objetivo de verificar a correlação entre os dados, conforme Tabela 2.

Em relação ao estudo de Yao et al. (2020), destaca-se o cloreto de sódio (NaCl), cuja curva de descarga apresentou desvio padrão de 2,73 para o tempo de descarga (h) e 0,81 para a tensão (V). A correlação linear foi de -0,85, enquanto a não-linear atingiu -0,97. Segundo os dados de Ojanen et al., (2018), o sulfato de sódio (Na_2SO_4) mostrou-se promissor, com desvio padrão de 5,77 para o tempo de descarga (h) e 0,50 para a tensão (V), além de correlações de -0,87 (linear) e -0,91 (não-linear). Finalmente, Wang et al., (2022) apresenta o NaCl , com desvio padrão de 3,17 para o tempo de descarga e 1,14 para a tensão, e correlações linear de -0,66 e não-linear de -0,71.

Além disso, foi realizada uma comparação entre a taxa de variação da tensão em diferentes curvas, de modo a verificar se existe alguma correlação direta entre a concentração e o tempo de

descarga, uma vez que não foi possível calcular a correlação, dado que a concentração permanece constante ao longo de cada curva, variando apenas entre uma curva e outra. Os resultados dessa comparação estão apresentados na Figura 3.

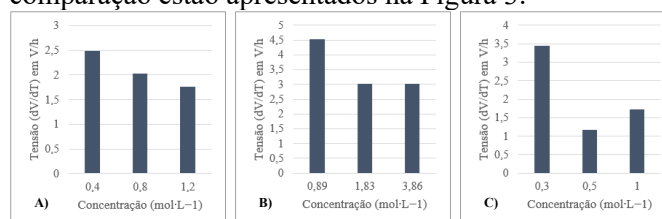


Figura 3 – Taxa de variação da tensão (dV/dt) em função das concentrações: A) NaCl (0,4; 0,8 e 1,2 mol/L), B) NaCl (0,89; 1,83 e 3,86 mol/L), e C) NaCl (0,3; 0,5 e 1 mol/L).

Fonte: autoria própria (2025).

Na Figura 3 é possível visualizar em geral uma redução da taxa com o aumento da concentração. Na Figura A) redução contínua, B) redução seguida de estabilização e C) redução com novo aumento. Esses comportamentos são explicados pelo efeito de deposição salina, úteis para a determinação da melhor faixa de operação.

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

	Na ₂ CO ₃		NaCl		Na ₂ SO ₄		FeSO ₄		ZnSO ₄	
	(Wang et al., 2022)		(Yao et al., 2020)		(Ojanen et al., 2018)		(Wang et al., 2022)		(Yao et al., 2020)	
	Tempo (h)	Tensão (V)	Tempo (h)	Tensão (V)	Tempo (h)	Tensão (V)	Tempo (h)	Tensão (V)	Tempo (h)	Tensão (V)
Média	12,29	2,72	3,07	1,68	6,26	2,21	5,65	1,92	5,27	1,40
Mediana	11,68	2,69	2,44	1,40	5,85	2,31	4,81	1,69	3,72	0,96
Mínimo	-0,06	1,85	0,00	0,61	0,00	0,01	0,00	0,50	-0,07	0,43
Máximo	24,92	3,73	8,52	3,49	12,33	4,03	14,51	3,70	15,67	3,56
Amplitude	24,98	1,88	8,51	2,88	12,33	4,02	14,51	3,20	15,74	3,13
Variância	46,67	0,49	7,45	0,65	9,88	1,83	10,07	1,29	26,35	0,80
Desvio padrão	6,83	0,70	2,73	0,81	3,14	1,35	3,17	1,14	5,13	0,89
Pearson	-0,79		-0,85		-0,52		-0,66		-0,77	
R ² (Pearson)	0,63		0,72		0,27		0,43		0,59	
Spearman	-0,84		-0,97		-0,64		-0,71		-0,95	
R ² (Spearman)	0,71		0,95		0,41		0,51		0,91	

	MnSO ₄		Na ₂ SO ₄		ZnSO ₄	
	(Yao et al., 2020)		(Wang et al., 2022)		(Ojanen et al., 2018)	
	Tempo (h)	Tensão (V)	Tempo (h)	Tensão (V)	Tempo (h)	Tensão (V)
Média	9,15	1,53	16,51	3,59	9,90	3,23
Mediana	7,64	1,19	16,80	3,58	9,73	3,45
Mínimo	-0,08	0,60	0,78	3,50	0,01	2,54
Máximo	24,01	3,50	33,35	3,70	19,99	4,00
Amplitude	24,08	2,90	32,57	0,20	19,98	1,46
Variância	51,64	0,68	82,80	0,00	33,27	0,25
Desvio padrão	7,19	0,83	9,10	0,05	5,77	0,50
Pearson	-0,80		-0,93		-0,87	
R ² (Pearson)	0,64		0,87		0,75	
Spearman	-0,93		-0,93		-0,91	
R ² (Spearman)	0,86		0,87		0,83	

Tabela 2 – Análise estatística dos dados.

Fonte: autoria própria (2025).

Conclusões

Conclui-se que o banco de dados desenvolvido a partir dos dados extraídos apresenta boa correlação entre tensão e tempo de descarga. O NaCl, sal mais recorrente na literatura, destacou-se pela consistência dos resultados e pelos baixos desvios padrão. Entretanto, não foi possível estabelecer uma relação direta entre a concentração e a taxa de descarga apenas com os dados obtidos.

Agradecimentos

Agradeço a Universidade Federal de Itajubá pela oportunidade de estudo e financiamento e à Prof.^a Dra. Letícia F. Turetta pelo apoio durante toda a pesquisa.

Referências

BAUM, Zachary J. *et al.* Lithium-Ion Battery Recycling—Overview of Techniques and Trends. *ACS Energy Letters*, v. 7, n. 2, p. 712–719, 11 fev. 2022.

BRÜCKNER, Lisa; FRANK, Julia; ELWERT, Tobias. Industrial Recycling of Lithium-Ion Batteries—A Critical Review of Metallurgical Process Routes. *Metals*, v. 10, n. 8, p. 1107, 18 ago. 2020.

KIM, Seoa *et al.* A comprehensive review on the pretreatment process in lithium-ion battery recycling. *Journal of Cleaner Production*, v. 294, p. 126329, abr. 2021.

KIM, Taehoon *et al.* Lithium-ion batteries: outlook on present, future, and hybridized technologies. *Journal of Materials Chemistry A*, v. 7, n. 7, p. 2942–2964, 2019.

LI, Xueyan *et al.* Revealing the mechanism of stress rebound during discharging in lithium-ion batteries. *Journal of Energy Storage*, v. 58, p. 106454, fev. 2023.

OJANEN, Severi *et al.* Challenging the concept of electrochemical discharge using salt solutions for lithium-ion batteries recycling. *Waste Management*, v. 76, p. 242–249, jun. 2018.

RAMASUBRAMANIAN, Brindha *et al.* Ten major challenges for sustainable lithium-ion batteries. *Cell Reports Physical Science*, v. 5, n. 6, p. 102032, jun. 2024.

ROUHI, Hassan *et al.* Voltage behavior in lithium-ion batteries after electrochemical discharge and its implications on the safety of recycling processes. *Journal of Energy Storage*, v. 35, p. 102323, mar. 2021.

TORABIAN, Mohammad Mahdi; JAFARI, Milad; BAZARGAN, Alireza. Discharge of lithium-ion batteries in salt solutions for safer storage, transport, and resource recovery. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, v. 40, n. 4, p. 402–409, 1 abr. 2022.

WANG, Hao *et al.* An effective and cleaner discharge method of spent lithium batteries. *Journal of Energy Storage*, v. 54, p. 105383, out. 2022.

YAO, Lin Peng *et al.* An environmentally friendly discharge technology to pretreat spent lithium-ion batteries. *Journal of Cleaner Production*, v. 245, p. 118820, fev. 2020.