

ANÁLISE DO DESCARREGAMENTO DE BATERIAS DE ÍON-LÍTIO PARA VIABILIZAR A LOGÍSTICA REVERSA

Maria Eduarda Cecilio Lopes (Universidade Presbiteriana Mackenzie) –
mariaececilio@live.com

Max Filipe Silva Gonçalves (Universidade Presbiteriana Mackenzie) –
max.goncalves@mackenzie.br

Resumo

Este artigo explora a evolução das baterias de íons de lítio (LIBs, do inglês Lithium-Ion Batteries), inicialmente utilizadas em dispositivos eletrônicos portáteis e, atualmente, aplicadas em diversas áreas devido a características como baixo peso, alta densidade de energia e longa vida útil. O aumento na demanda por LIBs levanta preocupações ambientais, destacando a importância crucial da reciclagem para mitigar impactos negativos e reduzir a extração de matérias-primas valiosas. A maioria dos processos de reciclagem de LIBs, atualmente baseados em métodos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos, foca na recuperação de metais valiosos, negligenciando materiais passíveis de reutilização. O crescimento no uso de LIBs em setores como eletrônicos e veículos elétricos intensifica os desafios na gestão de resíduos, especialmente devido ao aumento na demanda por minerais críticos. O artigo destaca o desequilíbrio entre a oferta e demanda de lítio, cobalto e níquel, sublinhando a necessidade de uma abordagem sustentável no ciclo de vida das LIBs. Dúvidas sobre a sustentabilidade das cadeias de fornecimento e valor das LIBs surgem com seu contínuo crescimento, questionando sua confiabilidade como tecnologia líder a longo prazo, considerando possíveis consequências não intencionais.

Palavras-Chaves: *Logística Reversa; Baterias de Íon-Lítio. Resíduos Sólidos.*

1. Introdução

As baterias de íons de lítio foram inicialmente usadas como componente de energia para dispositivos eletrônicos portáteis, desde telefones celulares, Power banks, tablets, laptops até câmeras e filmadoras. Atualmente, as LIBs são incorporadas em áreas de aplicação cada vez mais amplas devido a algumas de suas vantagens exclusivas, como baixo peso, pouca manutenção, alta densidade de energia, alta confiabilidade e longa vida útil (Mossali et al.,

2020), além de causar menor impacto ambiental quando descartadas em comparação às baterias ácidas a base chumbo e cádmio (Li et al., 2012). Estes fatores desencadearam um aumento extraordinário na capacidade e massa das baterias disponibilizadas no mercado na última década.

Para atender a demanda crescente, a reciclagem assume um papel essencial neste processo, uma vez que, reduz o impacto ambiental que seria gerado caso as baterias fossem descartadas de maneira inadequada e diminui a extração de matéria-prima virgem, minimizando os desafios da escassez de lítio e outros metais valiosos, como o cobalto, níquel e manganês, além de gerar retorno econômico para o setor industrial.

A maioria dos processos de reciclagem de LIBs é, atualmente, baseada em pirometalurgia e hidrometalurgia. Estes visam apenas a recuperação de alguns metais valiosos, descartando materiais constituintes importantes que poderiam ser reaproveitados. (Ronchini, Carolina, 2022).

Os desafios relacionados à gestão destes resíduos podem ser evidenciados pelo elevado consumo de eletrônicos, veículos elétricos e armazenamento de energia renovável. O aumento do uso de recursos naturais por meio da produção industrial de produtos e serviços promove o desenvolvimento econômico da sociedade, mas por outro lado, a rápida implantação de tecnologias de energia limpa como parte das transições energéticas implica em um aumento significativo na demanda por minerais críticos. Em 2022, a demanda de lítio excedeu a oferta (como em 2021), apesar do aumento de 180% na produção desde 2017. Em 2022, cerca de 60% do lítio, 30% do cobalto e 10% da demanda de níquel foi para baterias de veículos elétricos. Apenas cinco anos antes, em 2017, essas participações giravam em torno de 15%, 10% e 2%, respectivamente. (IEA, 2023). O crescente número de veículos elétricos (EV) agrava o desperdício dos metais pós uso.

Com o contínuo crescimento do mercado de eletrônicos, consolidam-se dúvidas em torno da sustentabilidade de suas cadeias de fornecimento e valor. Estes fatores levaram a questionar a confiabilidade das LIBs como a tecnologia líder a longo prazo uma vez que o processo de descarte pode apresentar consequências não intencionais que serão tratadas ao decorrer do artigo.

Embora o uso de baterias de íon-lítio possibilite o emprego de fontes de energia alternativas e, portanto, de menor impacto de carbono do que energias fósseis, os problemas de fim de vida não podem ser ignorados devido aos seus potenciais riscos ambientais e legais quanto o descarte

é incorreto. Ainda não existe um padrão para descartar baterias de íon-lítio, este resíduo é considerado perigoso em fim de vida. Como a tecnologia das baterias está em rápida evolução e pode enfrentar inovações disruptivas, incluindo desempenho aprimorado, os negócios de recuperação são afetados, tornando-se instáveis (Alamerew; Brissaud, 2020). Elas apresentam uma ampla variedade de materiais e diferem, principalmente, pela escolha do material catódico, os quais influenciam em menores taxas de reciclagem quando comparadas a outras tecnologias de baterias (Eurobat, 2015). Embora a adoção do reuso ou remanufatura de LIBs juntamente com a reciclagem pode reduzir potencialmente os custos e impactos ambientais, ambas as práticas ainda estão em fases iniciais em todo o mundo (Mahmood e Gutteridge, 2019). Questões de viabilidade econômica, cadeias de suprimentos abrangentes e a falta de regulamentações relevantes também impedem o desenvolvimento em larga escala da reutilização.

Portanto, este trabalho tem como objetivo, a avaliação do processo de descarregamento de baterias íon-lítio para viabilização da rede de logística reversa deste resíduo.

Os métodos de processamento das baterias após o uso, incluem principalmente descarte, reciclagem e reutilização. A reciclagem de baterias em fim de vida possui obstáculos fundamentais e tecnológicos a serem superados, o que justifica a necessidade de um modelo que analise e apresente soluções viáveis para superar esses obstáculos.

Para atender a essa demanda crescente, a reciclagem torna-se essencial, uma vez que, além de reduzir o impacto ambiental negativo que seria gerado se essas baterias fossem descartadas e na extração de matéria-prima virgem, minimiza os desafios da escassez de lítio e outros metais valiosos, como o cobalto, níquel e manganês e gera retorno econômico para o setor industrial.

2. Revisão da Literatura

1.1 LOGÍSTICA REVERSA

Segundo Stock (1998), o papel da logística consiste no retorno de produtos, redução de recursos, reciclagem, substituição de materiais, reutilização, disposição de resíduos, reforma, reparo e manufatura. Além disso, a logística engloba, entre outros, os fluxos de retorno de peças a serem reparadas, de embalagens e seus acessórios, de produtos devolvidos e de produtos usados/consumidos a serem reciclados (Dornier et al., 2000).

Considerando a grande quantidade de produtos produzidos com o ciclo de vida cada vez mais baixo, fez-se necessário o equacionamento logístico do retorno de uma parte destes produtos não utilizados ou consumidos. (Leite, 2018). O início do ciclo da logística reversa ocorre em função da existência de bens e serviços que já foram processados e destinados ao consumidor final, mas que retornaram ao processo produtivo devido às falhas nos processos ou em virtude de formas de reaproveitamento encontradas pelas empresas (Leite, 2009).

No contexto nacional, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (Brasil, 2010) trouxe o conceito de LR para a legislação brasileira, tornando a LR obrigatória para alguns tipos de materiais, e responsabilizando todos os agentes da cadeia de produção e consumo pela sua execução. A PNRS contribui para a solução de problemas ambientais, sociais e econômicos e embora tenha eficácia em mitigar os impactos ambientais futuros resultantes do descarte inadequado de baterias, acredita-se que é necessário promulgar uma legislação específica para abordar técnicas e estratégias particulares para ampliar as opções de destinação final que sejam ambientalmente adequadas. O objetivo é assegurar a preservação de um meio ambiente em equilíbrio ecológico, conforme estipulado pela Constituição Federal. Economicamente, as empresas optam por realizar a logística reversa pelo fato de gerar economia no fluxo industrial, já que reutilizam e/ou reciclam produtos que irão compor a matéria prima de um novo produto. Legalmente, as empresas se beneficiam por estarem cumprindo as leis que regulamentam o gerenciamento de resíduos sólidos. Já no âmbito social, a logística reversa é extremamente importante, já que cumpre seu papel ecológico evitando que produtos sejam descartados de maneira incorreta, preserva e diminui impactos ambientais reduzindo a necessidade de extração da matéria prima. Além disso, a logística é capaz de aumentar e melhorar a visibilidade das empresas, uma vez que o seu estabelecimento favorece a funcionalidade e rentabilidade dos mercados de reuso, pois permite que um recuperador de produtos usados apresente, simultaneamente, as funcionalidades de um comprador, quando compra/adquire os produtos, e de um vendedor quando os revende (Fleischmann, 2001). A PNRS surgiu em 2010 e ainda pouco se manifesta.

Em geral, as principais barreiras técnicas nos processos de reuso e reciclagem incluem questões de segurança, métodos de avaliação e técnicas de triagem e reagrupamento (Standridge e Corneal, 2014; Wu et al., 2018). Um processo adequado deve ser seguro, reduzir os riscos na instalação, minimizar o risco de incêndio ou explosão, diminuindo ou eliminando a interação humana com a bateria. O processo também deve ser rápido, para garantir que o descarte não se torne um gargalo e seja sustentável e viável.

A logística reversa é um dos aspectos da economia circular e pode ser aplicada em duas situações diferentes: pós-venda e pós-consumo, ou seja, quando ocorre o descarte. Neste caso, pretende-se estruturar uma rede de logística reversa de pós-consumo e consequentemente um sistema recuperável que aumenta a vida útil do produto por meio de reciclagem, reparo, reforma e remanufatura das LIBs. Para que se aplique o processo de logística reversa, é necessário que haja pelo menos um motivador. No aspecto econômico, o retorno financeiro pode ser obtido através da venda do resíduo proveniente da bateria triturada. A identificação dos componentes passíveis de reutilização e a pirâmide de hierarquia dos resíduos [Figura 1] (PAPARGYROPOULOU et al., 2014) é aplicada.

Figura 1 – Hierarquia dos Resíduos



Fonte: Adaptado de PAPARGYROPOULOU et al., 2014.

1.2 GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

De acordo com a PNRS, os resíduos sólidos são materiais, substâncias, objetos ou bens descartados resultantes de atividades humanas em sociedade, aos quais a destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder. Podem apresentar-se no estado sólido ou semissólido, gasoso (quando contidos em recipientes) e líquido (quando apresentem particularidades que tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível). Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. (PNRS).

Normalmente, a gestão de resíduos segue uma hierarquia, que é uma ordem preferencial de opções de tratamento de resíduos que visa reduzir os impactos ambientais, priorizando a prevenção, o reaproveitamento, a reciclagem e a recuperação sobre o aterro sanitário (Hultman; Corvellec, 2012). Quando as LIBs são descartadas em aterros, os elementos químicos lixiviados liberam poluentes para o meio ambiente, especialmente quando os recipientes são degradados quimicamente ou destruídos (Winslow et al., 2018). A padronização dos designs das baterias pode aumentar a eficiência da reciclagem.

As baterias usadas contêm metais valiosos, a mineração desses metais tem levado a escassez, criando um mercado para esses produtos reciclados. As abordagens para lidar com baterias aposentadas incluem principalmente o descarte, reciclagem e reutilização (Alfaro-Algaba e Ramirez, 2020; Chen et al., 2019; Harper et al., 2019). O descarte significa que baterias aposentadas com baixa qualidade serão descartadas ou depositadas em aterro. O descarte gera desperdício de materiais recicláveis e valiosos. Além disso, metais pesados e eletrólitos podem contaminar o solo e a água, o que pode causar danos irreversíveis ao meio ambiente (Lv et al., 2018; Pagliaro e Meneguzzo, 2019). Do ponto de vista socioambiental, o descarte é a opção menos desejada para o tratamento. As baterias de íon-lítio podem ser consideradas como Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).

Embora geralmente não contenham chumbo ou cádmio como as baterias de chumbo-ácido ou baterias de níquel-cádmio, as LIBs contêm metais lixiviáveis que podem lixiviar lentamente para o meio ambiente, o que poderia prejudicar e afetar a qualidade ambiental e a saúde humana (Wang et al., 2016). As LIBs geralmente contêm materiais inflamáveis, portanto, há risco de incêndio durante o aterro ou no processo de transporte. A etapa de descarga é extremamente importante para a segurança do processo de reciclagem, pois se as baterias não forem descarregadas, há sempre o risco de curto-circuito do ânodo e do cátodo, o que libera energia química armazenada (Yao et al., 2018). Essa liberação repentina de energia pode ser poderosa e severa, causando aumento repentino de temperatura, liberação de gás, incêndios ou até mesmo explosões. Por isso, essas baterias devem ser depositadas em aterros específicos quando descartadas. Como alternativa ao aterro sanitário, a reciclagem de baterias fornece benefícios ambientais (Bernardes; Espinosa; Tenório, 2003), permitindo a recuperação de recursos não renováveis, reduzindo os impactos ambientais da mineração e fabricação de materiais virgens, e reduzir os impactos ambientais do aterro sanitário (LEWIS, 2010). O processo de reciclagem de LIBs envolve várias etapas, incluindo descarga, desmontagem, pré-tratamento, lixiviação de metais e separação. Os métodos de pré-tratamento incluem

principalmente descarga, desmontagem, trituração, peneiramento e separação (Harper et al., 2019; Yun et al., 2018).

A rápida implantação de tecnologias de energia limpa como parte das transições energéticas implica um aumento significativo na demanda por minerais. Além disso, grandes flutuações no preço das matérias-primas da bateria e o custo cada vez menor das baterias lançam incertezas sobre a economia da reciclagem e reduzem o incentivo à essa prática. Isto faz com que os preços dos componentes internos da bateria aumentem e que se tornem cada vez mais escassos. As preocupações com a volatilidade dos preços e a segurança do abastecimento não desaparecem em um sistema de energia eletrificado e rico em energias renováveis. A reciclagem de LIBs incorre em custos ambientais, incluindo consumo de energia e água. Os impactos ambientais variam com base nos métodos de reciclagem e nos tipos de baterias.

METODOLOGIA

CLASSIFICAÇÃO DA METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido por meio de pesquisas teórica e prática. A pesquisa prática foi desenvolvida com a empresa caracterizada como XRS. Para o descarte correto das baterias, o primeiro passo foi descarregar as baterias em solução salina com aditivo de Limalha de Cobre. Os testes de laboratório para descarga das baterias foram realizados na Universidade Presbiteriana Mackenzie. Foram utilizados métodos de pré-tratamento, como a trituração das baterias de íon-lítio para separação dos metais preciosos e não preciosos para venda posterior. Para descarregar as baterias foram submersas em solução salina que resulta em curto-circuito controlado.

A pesquisa realizada pode ser caracterizada como pesquisa exploratória. A utilização de diferentes concentrações de carbonato de sódio e cobre nos testes iniciais, seguida por uma mudança para concentração fixa de carbonato de sódio no segundo teste.

A abordagem da metodologia adotada neste trabalho foi qualitativa e quantitativa. Quanto a parte qualitativa: foi feita a descrição dos procedimentos experimentais, como a imersão das baterias em solução salina, a observação da formação de bolhas durante a eletrólise, a identificação de reações químicas no ânodo e no cátodo, e a ênfase na ausência de oxidação nos terminais. A análise das condições experimentais e a importância do controle eficaz do

comportamento eletroquímico indicam uma abordagem qualitativa na interpretação dos resultados. Já a abordagem quantitativa conta com a utilização de instrumentos de medição, como voltímetro e termômetro, para registrar dados como a voltagem da bateria ao longo do tempo e a temperatura da solução durante a reação.

3.2 MATERIAIS, MÉTODOS e PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os materiais utilizados nos testes foram béqueres individuais, baterias padronizadas (usadas e descartadas), limalha de cobre, carbonato de sódio e água destilada. Um voltímetro para registrar a descarga da bateria ao longo do estudo e um termômetro para medir a temperatura da solução durante a reação. Os materiais foram fornecidos pela Universidade Presbiteriana Mackenzie e pela empresa XRS.

Para o descarte de baterias de íon-lítio, foram trituradas após o descarregamento em banho de água destilada, carbonato de sódio e cobre em diferentes quantidades. O cobre foi usado para composição da solução de descarregamento das baterias por ser o metal de melhor comportamento sob aspectos de condutividade elétrica e térmica, além da boa conformabilidade em razão da sua ductibilidade, boa resistência a corrosão quando exposto a soluções aquosas e químicas. A bateria não foi diretamente submersa na solução salina, portanto sua condição física não foi ameaçada. Com este método, a evolução da descarga da bateria pode ser monitorada e controlada, sendo possível avaliar o potencial de descarga da solução e o efeito rebote quando a bateria é retirada da solução.

Para garantir a segurança dos testes, todas as baterias utilizadas eram usadas. A ausência de oxidação nos terminais é fundamental para impedir a infiltração de água no interior das baterias. Em caso de oxidação, os testes devem ser abortados por questões de segurança. A escolha da solução de carbonato de sódio se deve à sua capacidade de não oxidar as superfícies metálicas e provocar a reação de eletrólise.

No primeiro teste, utilizou-se cinco baterias submersas em solução salina aquosa em béqueres individuais com diferentes concentrações de carbonato de sódio (Na_2CO_3) e aditivo de cobre metálico (Cu) em água destilada. A voltagem das baterias foi medida antes da imersão em solução salina ($v_1 = 0$), ao serem retiradas do banho após 3h ($v_2=180\text{min}$) na concentração e 6h ($v_3=360\text{min}$) após retirada do banho, buscou-se medir o efeito rebote de voltagem. As concentrações foram variadas e os resultados foram registrados em diferentes momentos (v_1 , v_2 , v_3) para analisar a dinâmica temporal das respostas.

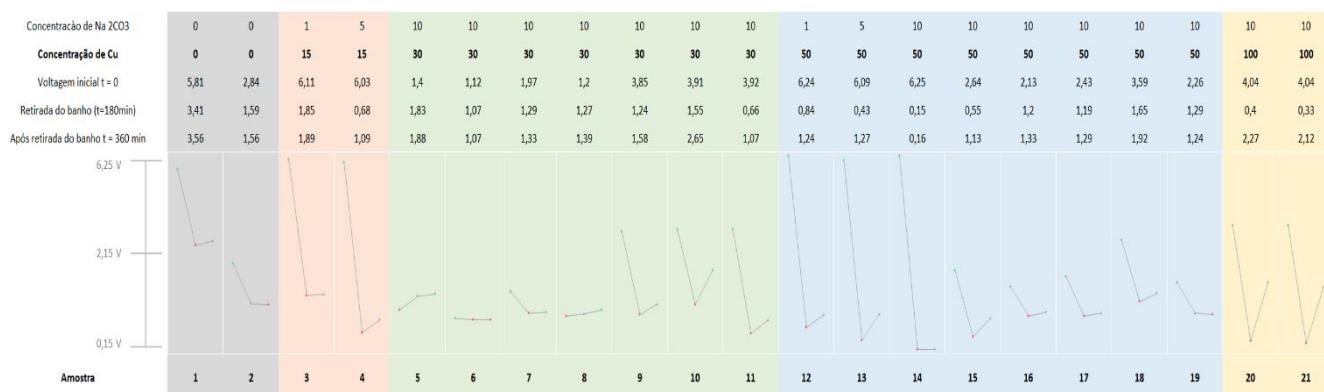
A solução salina neste caso atuou como um curto-circuito controlado ou como um resistor primitivo. A reação iniciou-se rapidamente, mostrando que todas as baterias apresentavam carga residual, por conta disso, apresentaram formação de gás quando mergulhadas nas soluções salinas. A constatação de uma leve corrosão nos terminais (bateria 1) não alterou as reações de eletrólise que envolveram a descarga da bateria, porém estas baterias foram descartadas pela medição imprecisa de carga após a corrosão. Foram observadas alterações de temperatura perceptíveis ao toque no bquer. O acompanhamento e monitoramento da temperatura foi realizado através de termômetros e apesar da elevação inicial de temperatura, as alterações na temperatura não interferiram o teste. A partir do segundo teste, foram utilizadas concentrações fixas de carbonato de sódio e as concentrações de cobre foram alteradas. Neste teste, foram utilizadas 11 baterias. Durante o processo de eletrólise, identificaram-se reações químicas prováveis no ânodo e no cátodo, enfatizando a crucial ausência de oxidação nos terminais para prevenir a infiltração de água no interior das baterias.

2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados indicam que a ausência de uma relação linear entre concentrações e medições de voltagem sugere a presença de fatores complexos no comportamento eletroquímico. A decisão de reduzir a amostra de 30 para 21 baterias, com o objetivo de minimizar erros de medição, contribuiu para a obtenção de resultados mais precisos. A manutenção das baterias no banho foi adotada para mitigar o efeito de relaxamento de tensão, um aspecto crítico para assegurar a confiabilidade dos resultados.

Manter a bateria no banho reduziu o efeito de relaxamento de tensão. O [Gráfico I] a seguir apresenta os resultados dos três dias de teste, onde medimos a voltagem da bateria logo antes de inserida no banho, logo após a retirada (3h no banho) e após 3h fora do banho, com concentrações diferentes de Na_2CO_3 e Cobre (Cu) em gramas.

Gráfico 1 –Ilustração da variação da voltagem (V) em função do tempo



Fonte: Autores

A análise revelou variações significativas na voltagem após 180 minutos, destacando a sensibilidade do sistema a alterações experimentais. A diminuição observada em algumas amostras sugere um potencial correlação entre a retirada do banho e as concentrações de Na₂CO₃ e Cu. No entanto, a natureza precisa dessa relação demanda uma abordagem estatística mais robusta. A continuidade das variações na voltagem após 360 minutos sugere a persistência de efeitos decorrentes das concentrações de Na₂CO₃ e Cu. A análise longitudinal ressalta a importância de investigar as dinâmicas temporais e de considerar não apenas os valores pontuais, mas também as tendências ao longo do tempo. Para estabelecer relações mais precisas, propõe-se a realização de análises estatísticas, como correlações e regressões, entre as concentrações de Na₂CO₃ e Cu e as respostas de voltagem.

Uma análise da regressão linear realizada em Excel entre as variáveis Concentração de Na₂CO₃ E Cobre foi feita e o resumo dos resultados foram demonstrados na [Figura 1]:

Figura 1 – Resumo dos Resultados a partir da Regressão Linear

RESUMO DOS RESULTADOS	
<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,50658192
R-Quadrado	0,256625242
R-quadrado ajustado	0,217500254
Erro padrão	3,43902962
Observações	21

Fonte: Autores

A análise estatística apresentada refere-se a uma regressão linear simples, que busca entender a relação entre a variável dependente (a voltagem das baterias) e uma variável independente (Concentração de Carbonato de Sódio e Cobre). O R múltiplo indica que aproximadamente

50,7% da variabilidade na variável dependente (voltagem) pode ser explicada pelas variáveis independentes. Quanto ao R-Quadrado (Coeficiente de Determinação): Representa a proporção da variância na variável dependente que é previsível a partir das variáveis independentes. Neste caso, 25,7% da variabilidade na voltagem é explicada pela concentração de Cu. O Erro padrão representa a média das diferenças absolutas entre os valores observados e os valores previstos. Neste caso, é de aproximadamente 3,44.

A [Figura 2] representa a ANOVA (Análise de Variância), o valor F é 6,56, com um p-valor de 0,0191, indicando que a regressão é estatisticamente significativa.

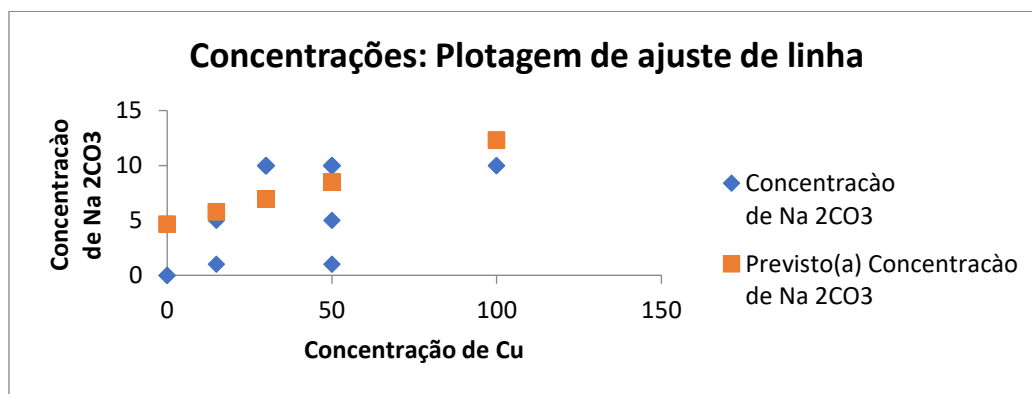
Figura 2 - ANOVA

ANOVA					
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	77,57414	77,57414	6,559114	0,019104539
Resíduo	19	224,7116	11,82692		
Total	20	302,2857			

Fonte: Autores

Quanto aos intervalos de confiança (95%), Na₂CO₃ varia entre 1,68 e 7,60 e para a concentração de Cu, varia entre 0,014 e 0,140. O [Gráfico 2] representa a plotagem das concentrações dos respectivos materiais.

Gráfico 2 - Concentrações



Fonte: Autores

A determinação de relações lineares ou não lineares é essencial para compreender a natureza dessas interações. Além disso, é imperativo considerar a possível influência de variáveis não examinadas que podem contribuir para as variações observadas. Para uma interpretação mais precisa, futuras investigações devem incorporar a identificação e controle de variáveis experimentais, bem como a exploração de outros fatores que possam modular as respostas



observadas. Essa abordagem holística é crucial para garantir a validade e a generalização dos resultados obtidos.

Considerações Finais

Foi possível investigar a eletrólise em solução salina como um método para descarregar baterias visando a preparação para trituração segura, separação e descarte posterior.

Os resultados indicam que a eletrólise em solução salina é uma abordagem viável para o processo de descarga de baterias. No entanto, ressaltamos a importância de uma consideração cuidadosa das condições experimentais, como as concentrações de carbonato de sódio e cobre, para uma compreensão e controle eficazes do comportamento eletroquímico durante o processo de descarga. Essa compreensão é fundamental para desenvolver práticas adequadas de descarte e reciclagem, minimizando riscos de segurança e otimizando a eficiência na recuperação de materiais dessas baterias. Em síntese, os resultados preliminares deste estudo indicam a complexidade das relações entre as concentrações de Na_2CO_3 e Cu.

O modelo regressão é significativo, indicando que a concentração de cobre influencia estatisticamente a voltagem. O R-quadrado de 25,7% sugere que o modelo explica uma parte razoável da variabilidade na voltagem, embora haja espaço para melhorias. O coeficiente para a concentração de cobre é estatisticamente significativo, e seu intervalo de confiança não inclui zero, o que reforça a importância dessa variável na explicação da voltagem.

REFERÊNCIAS

ALAMEREW, Yohannes A.; BRISSAUD, Daniel. **Circular economy assessment tool for end-of-life product recovery strategies**. Journal of Remanufacturing, Springer Science e Business Media LLC, v. 9, n. 3, p. 169–185, out, 2018.

BERNARDES, A. M.; ESPINOSA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S. **Collection and recycling of portable batteries: a worldwide overview compared to the Brazilian situation**. Journal of power sources, Lausanne, Suíça, v. 124, n. 2, p. 586-592, nov, 2003.

BRASIL, **Lei Nº 12.305** de 02 de agosto de 2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).

DORNIER, P. P.; ERNST, R.; FENDER, M.; KOUVELIS, P. **Logística e Operações Globais: texto e casos**. São Paulo: Atlas, 2000.

EUROBAT. **Eurobat e-mobility battery R&D Roadmap 2030 - Battery Technology for vehicle applications**. [S.l.], 2015.

Fan E., Li L., Wang Z., Lin J., Huang Y., Yao Y., Chen R., Wu F. **Sustainable recycling technology for Li-ion batteries and beyond: challenges and future prospects**. Chem. Rev. 2020.

FLEISCHMANN, M. **Reverse Logistics Network Structures and Design**. Erim Report Series Research in Management. Erasmus Research Institute of Management. ERS-2001-52-LIS. Netherlands.p.1-26, 2001.

Harper G., Sommerville R., Kendrick E., Driscoll L., Slater P., Stolkin R., Walton A., Christensen P., Heidrich O., Lambert S. **Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles**. Nature. 2019.

Huang *et al*, **Recycling of lithium-ion batteries: Recent advances and perspectives** J. Power Sources, 399, 2018.

IEA, **Global EV Outlook 2023**, IEA, Paris. 2023.

IEA, **The Role of Critical World Energy Outlook Special Report Minerals in Clean Energy Transitions**: World Energy Outlook Special Report. 2021.

J. Hultman, H. Corvellec. **The European Waste Hierarchy: from the sociomateriality of waste to a politics of consumption**, 2012.

LEITE, P. R. LOGÍSTICA REVERSA: **MEIO AMBIENTE E COMPETITIVIDADE**. SÃO PAULO: PEARSON PRENTICE HALL, 2009.

LEWIS, H. **Battery waste and recycling**. Issues Magazine, Australia, n. 92, set. 2010.

Li. L., Lu Y., Zhang X., Chen R., Wu F., Amine K. **Ascorbic-acid-assisted recovery of cobalt and lithium from spent Li-ion batteries**. Journal of Power Sources 2018 (2012) 21-27.

LI, L.; ZUMBIR.; XU, Y.; FU, C.; JIN, G.; LI, Z. **Estimativa do estado de carga para bateria de íons de lítio com base no algoritmo de filtro H-Infinity**. Ciências Aplicadas. v.10, 2021

Lv *et al.*, W. Lv, Z. Wang, H. Cao, Y. Sun, Y. Zhang, Z. Sun. **A Critical Review and Analysis on the Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries**. ACS Sustainable Chem. Eng., 2018.

M. Alfaro-Algaba *et al.* **Techno-economic and environmental disassembly planning of lithium-ion electric vehicle battery packs for remanufacturing**. Resour. Conserv. Recycl., 2020.

M. Pagliaro *et al.* **Lithium battery reusing and recycling: A circular economy insight** Heliyon, 2019.

Mossali, Elena & Picone, Nicoletta & Gentilini, Luca & Rodriguez, Olga & Perez, Juan M & Colledani, Marcello. **Lithium-ion batteries towards circular economy: A literature review of opportunities and issues of recycling treatments**. Journal of Environmental Management. 264, 2020.



PAPARGYROPOULOU, E. *et al.* **The food waste hierarchy as a framework for the management of food surplus and food waste.** *Journal of Cleaner Production*, v. 76, p. 106-115, 2014.

Ronchini, Carolina, Magda Bassoto **Separação do material catódico e anódico de baterias de íon lítio.** 2022

STOCK, J.R. **Development and Implementation of Reverse Logistics Programs.** Oaks Brook, IL, Council of Logistics Management Books, 1998.

Winslow, Kevin & Laux, Steven & Townsend, Timothy. **A review on the growing concern and potential management strategies of waste lithium-ion batteries.** *Resources, Conservation and Recycling*. 2018.

X. Zhang, L. Li, E. Fan, Q. Xue, Y. Bian, F. Wu, R. Chen. **Toward sustainable and systematic recycling of spent rechargeable batteries.** *Chem. Soc. Rev.*, 47, 2018.

XU, J. *et al.* **A review of processes and technologies for the recycling of lithium-ion secondary batteries.** *Journal of power sources*, Lausanne, Suíça, v. 177, n. 2, p. 512– 527, mar. 2008.

Yun L., Linh D., Shui L., Peng X., Garg A., Le M.L.P., Asghari S., Sandoval J. **Metallurgical and mechanical methods for recycling of lithium-ion battery pack for electric vehicles.** *Resour. Conservat. Recycling*. 2018.