



AVALIAÇÃO DA RECUPERAÇÃO DE LÍTIO E COBALTO DE BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO POR DIFERENTES SISTEMAS DE LIXIVIAÇÃO

Rayelle Caroline Silva¹

Juliana de Souza Ferreira²

Larissa Nayhara Soares Santana Falleiros³

Diogo Pimentel de Sá da Silva⁴

Daniela Aparecida Santos⁵

Râynne Kethene Silva⁶

Tecnologia Ambiental - Reaproveitamento, Reutilização e Tratamento de Resíduos (sólidos e líquidos)

Resumo

A reciclagem de metais que compõem lixos eletrônicos, como as baterias de íons de lítio (LIBs) usadas, representa uma fonte secundária destes componentes, além de ser uma alternativa de redução dos impactos ambientais e à saúde. As LIBs são fontes valiosas de materiais de recuperação, principalmente de lítio e de cobalto. Portanto, torna-se urgente definir um processo de reciclagem ambiental e economicamente viável que ofereça o retorno dos metais como matéria-prima em quantidade suficiente para a fabricação de novas LIBs, visto que seu consumo tem se elevado continuamente. A proposta deste estudo foi abordar a recuperação de Li e Co presentes nas LIBs, investigando a técnica de lixiviação que fornecesse a maior eficiência de recuperação dos metais de interesse. O pó de bateria empregado neste estudo foi composto do cátodo e do ânodo previamente moído com granulometria inferior a 250 µm. Para o processo de lixiviação, o meio lixiviante foi composto de 1,07 M de H₂SO₄ e 0,93 M de ácidos orgânicos provenientes de meio de fermentação. Os testes de lixiviação foram realizados a 70 ± 2 °C por 2,5 h e tendo razão sólido/líquido de 18,5 g/L, sendo comparados os efeitos gerados pela lixiviação sob sonicação (40 kHz e 200 W), agitação magnética (300 rpm) e sem agitação. Após a determinação da recuperação de lítio e cobalto em cada sistema de lixiviação avaliada, foi constatado estatisticamente que a agitação, seja mecânica ou por meio do uso de ultrassom, promove maiores valores de recuperação de lítio e cobalto, pois favorece a transferência de massa.

¹Mestranda em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, rayelle.silva@ufu.br

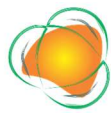
²Prof^a. Dr^a. Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, julianasf@ufu.br

³Prof^a. Dr^a. Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, larissa.falleiros@ufu.br

⁴Doutorando em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, diogo.pimentel@ufu.br

⁵Doutoranda em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, dani.barrochello@ufu.br

⁶Graduanda em Engenharia Civil, Faculdade Anhanguera, Unidade Acadêmica de Ipatinga, raynnekethene@outlook.com



Palavras-chave: lítio, cobalto, lixiviação, baterias de íons de lítio, sonicação.

INTRODUÇÃO

Atualmente, há uma demanda crescente por tecnologias que ofereçam alto desempenho energético. Nesse contexto, as baterias de íons de lítio (LIBs) têm despertado um interesse cada vez maior no mercado, pois oferecem uma solução eficiente para o armazenamento de energia renovável, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis (VERMA; CORBIN; SHIFLETT, 2021). Devido ao seu excelente desempenho, caracterizado por alta densidade energética, longa vida útil e baixa taxa de descarga, as LIBs têm sido amplamente utilizadas em dispositivos eletrônicos portáteis, bem como em veículos híbridos e elétricos (CHEN et al., 2021).

Apesar de ser uma tecnologia promissora, o crescimento do mercado de baterias de íons de lítio depende, fundamentalmente, da disponibilidade de metais essenciais para a fabricação dos cátodos, principalmente o lítio e o cobalto. Em 2020, a União Europeia divulgou a quarta lista de matérias-primas críticas (CRMs), que inclui 83 materiais considerados críticos devido à, sobretudo, sua importância econômica e ao risco de fornecimento. Nessa lista, o cobalto ocupava a décima posição e o lítio a décima oitava, devido ao alto risco de escassez a curto e médio prazo, uma vez que a produção desses metais está concentrada em poucos países (EUROPEAN COMMISSION, 2020).

É previsto que de 2015 a 2040 sejam gerados cerca de quatro milhões de toneladas métricas de baterias de íons de lítio em todo mundo. Dado o fato de se tratar de matérias-primas críticas, torna-se necessário buscar fontes secundárias para obtenção de lítio e cobalto. Neste sentido, a recuperação desses metais provenientes de baterias de íons de lítio se torna fundamental para a preservação de recursos naturais e materiais estrategicamente importantes para a sociedade, além de contribuir para a proteção do meio ambiente (LIN; LU; ZHANG, 2021).

No momento atual, os principais métodos de recuperação de lítio e cobalto provenientes de LIBs são através dos processos pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos (lixiviação) e biohidrometalúrgicos (biolixiviação), sendo os dois primeiros já aplicados em

Realização





escala industrial, enquanto o último ainda está em fase de pesquisa. No entanto, cada um desses métodos apresenta limitações ou desvantagens. Os processos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos podem causar poluição secundária devido ao uso de reagentes químicos e à geração de subprodutos indesejados. Além disso, esses processos consomem uma quantidade significativa de energia. Por outro lado, o processo de biolixiviação pode exigir um tempo prolongado para alcançar a recuperação desejada dos metais (BOTELHO JUNIOR et al., 2021).

Portanto, embora esses métodos possam apresentar uma taxa satisfatória de recuperação dos metais de interesse, é importante considerar as limitações e desvantagens associadas a cada um deles, como poluição secundária e consumo energético. Pesquisas contínuas estão sendo realizadas para melhorar esses processos e desenvolver alternativas mais eficientes e sustentáveis para a recuperação de lítio e cobalto provenientes de baterias de íons de lítio.

Diante desse contexto, objetivou-se neste estudo investigar a recuperação de lítio e cobalto por meio da lixiviação empregando-se um meio lixiviante composto por um efluente obtido por fermentação microbiana e ácido sulfúrico, sob aquecimento e diferentes condições de agitação (agitação mecânica, agitação promovida por ondas ultrassônicas e sem efeitos de agitação), visando obter melhorias nas condições de recuperação para contribuir com o avanço da tecnologia e para práticas sustentáveis no setor de recuperação de metais provenientes de baterias de íons de lítio.

METODOLOGIA

Para fins de padronização, todas as baterias de íons de lítio (LIBs) empregadas neste estudo eram da marca Samsung® proveniente do uso em aparelhos celulares. Todos os reagentes utilizados possuíam grau analítico e todas as diluições e amostras foram preparadas com água deionizada.

A Figura 1 representa o fluxograma das etapas da metodologia experimental do presente trabalho.

A etapa de descarga consistiu na imersão das baterias em solução salina de NaCl

Realização





10 % m/v por 10 minutos, seguida de imersão em solução salina de Na₂SO₄ 10 % m/v por 24 horas. Após este processo, as baterias foram secas em estufa a 60 °C por 24 h.

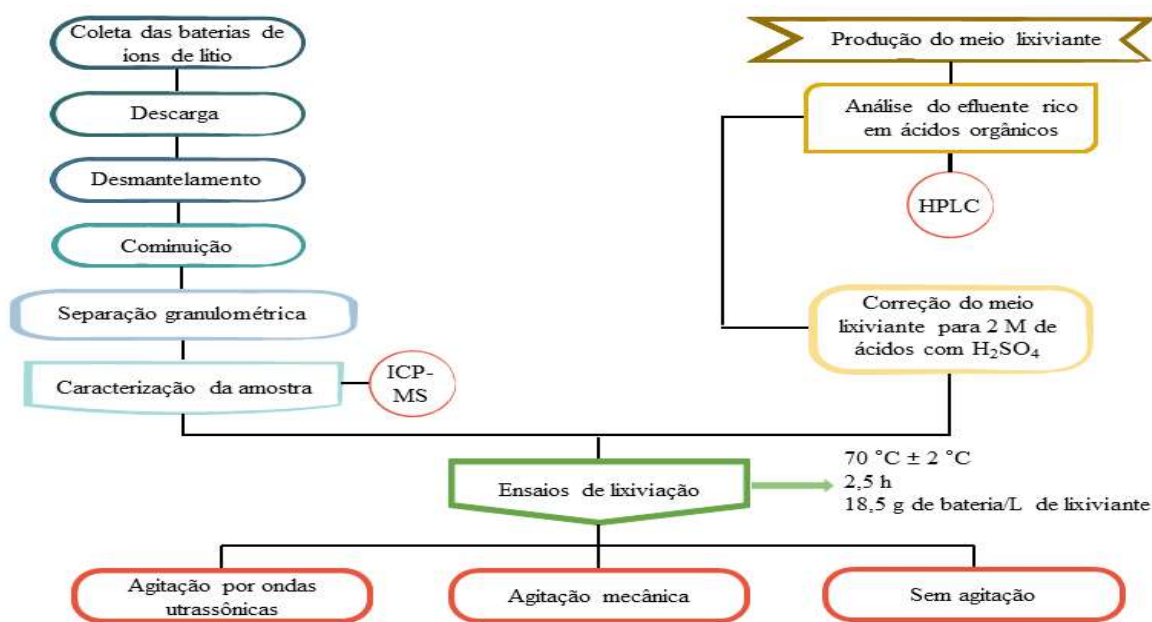


Figura 1. Fluxograma das etapas realizadas na fase experimental do presente trabalho

O processo de desmantelamento foi realizado de forma manual em capela de exaustão e utilizando-se equipamentos de proteção individual, tais como jaleco, avental, máscara de gás e luvas de látex. A embalagem plástica das baterias foi retirada com o auxílio de um alicate, restando-se apenas a carcaça metálica que foi prensada mecanicamente e rompida de forma manual também com a utilização de um alicate. Após o rompimento, o cátodo e o ânodo juntamente com o separador foram retirados da carcaça metálica, sendo o separador descartado e os materiais catódico e anódico secos em estufa a 60 °C por 24 horas.

Após a secagem do material catódico e anódico, estes foram picados e, em seguida, submetidos ao processo de cominuição em moinho de bolas, sendo utilizado jarro e bolas de cerâmicas. Levando-se em conta que, após a cominuição do cátodo e do ânodo, o pó de bateria obtido não possuía granulometria uniforme foi realizada a separação granulométrica a partir da técnica de peneiramento. Após o peneiramento, foram empregadas neste estudo as amostras que possuíam granulometria inferior a 250 µm.

Para fins de caracterização, as amostras foram submetidas à análise de espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS). Para fins da

Realização



realização da análise sem que houvesse a necessidade de realizar a digestão das amostras, antes da análise por ICP-MS, as amostras foram submetidas ao processo de ablação (processo de vaporização da amostra sólida por um feixe de laser de alta potência).

Levando-se em conta aspectos ambientais e econômicos, a diminuição do uso de ácido sulfúrico como agente lixiviante se faz necessária. Estudos realizados por Urias et al. (2021) constataram que o uso de lactose na concentração 0,09 M como agente redutor e o meio lixiviante produzido pela mistura de ácidos orgânicos proveniente do efluente obtido por ensaios de fermentação do consórcio microbiano, corrigido com ácido sulfúrico até a concentração de 2 M de ácidos totais, promoviam uma recuperação de lítio e cobalto superiores aos valores relatados nos estudos mais recentes da literatura e, simultaneamente, favorecia a redução do consumo de ácido inorgânico ao se empregar um meio rico em ácidos orgânicos que são biodegradáveis.

Diante disso, optou-se no presente trabalho por empregar um meio lixiviante para os ensaios de lixiviação nas condições propostas pelos estudos citados. Desta forma, o meio lixiviante empregado nos testes de lixiviação foi composto de 0,93 M de ácidos orgânicos (0,18 M de ácido acético, 0,13 M de ácido butírico, 0,58 M de ácido láctico e 0,04 M de ácido propiônico) e 1,07 M de ácido sulfúrico e 0,09 M de lactose.

Diversos tipos de sistema de lixiviação para recuperação de metais de alto valor agregado são reportados em trabalhos recentes da literatura, dos quais se destacam aquecimento: em banho, com agitação magnética e assistido por sonicação.

Diante disso, foram realizados testes para avaliação da recuperação de lítio e cobalto sob diferentes sistemas de lixiviação, sendo avaliados os seguintes sistemas: aquecimento em banho assistido por sonicação, aquecimento em banho sem efeito de agitação e aquecimento em manta térmica com agitação mecânica.

Os testes correspondentes ao aquecimento em banho com e sem emprego de sonicação foram realizados em uma lavadora ultrassônica da marca Ultronique, modelo Q5.9 que opera na faixa de temperatura de 30 a 80 °C e possui frequência ultrassônica de 40 kHz e potência ultrassônica de 200 W. O sistema de aquecimento com agitação mecânica foi montado com uma manta térmica (responsável pelo aquecimento) e um balão de fundo redondo de três bocas e volume de 100 mL. Uma das bocas do balão foi conectada a um

Realização



condensador, às outras duas foram adaptadas rolhas com furos no centro que permitiam a inserção de um agitador mecânico e um termômetro. A agitação empregada neste sistema foi de 300 rpm, sendo esta a condição empregada nos estudos de Urias et al. (2021).

Foram selecionadas para os experimentos as condições referentes a maior recuperação de metais que Urias et al. (2021) obteve em seus estudos. Tais condições consistiram em uma razão sólido/líquido (razão entre a massa a ser empregada de material a ser lixiviado por volume de lixiviante) de 18,5 g/L e tempo de 2,5 horas.

Em relação à temperatura, a condição ótima obtida por Urias et al. (2021) foi de 86 °C. Devido ao fato de que a lavadora ultrassônica utilizada para o banho operar somente até 80 °C, optou-se por realizar os experimentos a 70 ± 2 °C.

Após a lixiviação, as amostras foram filtradas em filtro a vácuo ainda quentes para evitar que a solução lixivante permanecesse agindo após o tempo de experimento, e as amostras foram diluídas e congeladas para quantificação do teor de metal recuperado por Espectroscopia por Absorção Atômica em Chama (EAAC).

O cálculo de quantidade de metal na amostra e de recuperação dos metais de interesse foi realizado, respectivamente, conforme as Equações 1 e 2:

$$\text{Quantidade de metal na amostra (\%)} = \frac{C_i \times v}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Recuperação (\%)} = \frac{\text{Quantidade de metal na amostra (\%)}}{\text{Teor de metal na amostra (\%)}} \times 100 \quad (2)$$

em que C_i (mg.L^{-1}) representa a concentração do elemento i no lixiviado, sendo esta obtida pela análise por EAAC; v (L) representa o volume de lixiviante utilizado na lixiviação; m_0 (mg) representa a massa de bateria empregada na lixiviação e o teor de metal na amostra corresponde à porcentagem em peso do elemento i na amostra, conforme determinado por ICP-MS.

Após a determinação da recuperação de lítio e cobalto em cada uma das amostras submetidas à lixiviação, foi aplicado o método estatístico do Teste de Tukey para verificar se os diferentes sistemas de lixiviação promoviam diferenças significativas na recuperação dos metais de interesse.

Realização



RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da técnica de espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado foi possível realizar a quantificação dos metais de interesse na amostra empregada nos experimentos de lixiviação, conforme expresso na Tabela 1.

Elemento	Concentração
Co	37,42 %
Li	7,25 %

Tabela 1. Quantificação dos metais de interesse na amostras empregada nos experimentos de lixiviação

Na Figura 2 é apresentado o gráfico de recuperação de lítio e cobalto obtido empregando-se os sistemas de lixiviação 1, 2 e 3, sendo estes os sistemas compostos por, respectivamente, aquecimento em banho assistido por sonicação (frequência ultrassônica de 40 kHz e potência ultrassônica de 200 W), aquecimento em manta térmica com agitação mecânica (300 rpm) e aquecimento em banho sem efeito de agitação.

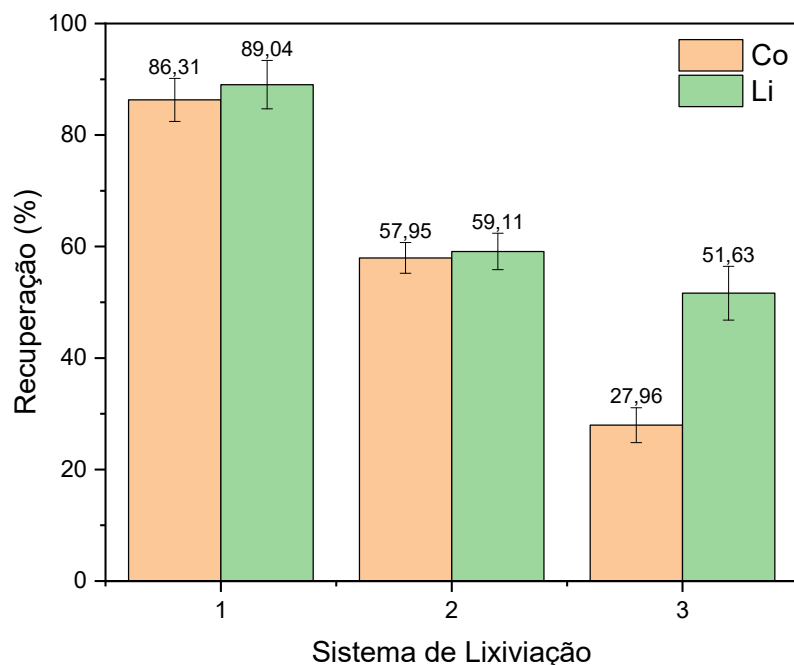


Figura 2. Gráfico de recuperação de lítio e cobalto após a lixiviação sob aquecimento a $70\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ sob diferentes sistemas de lixiviação

Realização



A partir da análise do gráfico representado na figura citada, observa-se que, para as amostras submetidas à lixiviação utilizando-se aquecimento em banho assistido por sonicação, a recuperação de lítio foi de $89,04 \% \pm 4,33 \%$ e a recuperação de cobalto foi de $86,31 \% \pm 3,86 \%$. Os valores de recuperação de lítio e cobalto obtidos pela lixiviação empregando-se o aquecimento em manta térmica com agitação mecânica correspondeu a, respectivamente, $60,91 \% \pm 3,86 \%$ e $63,52 \% \pm 2,07 \%$. Já as amostras submetidas à lixiviação utilizando-se aquecimento em banho termostaticado sem efeito de agitação, a recuperação dos metais de interesse foi de $51,63 \% \pm 4,83 \%$ para o lítio e $27,96 \% \pm 3,13 \%$ para o cobalto.

Comparando-se os valores de recuperação obtidos é possível verificar que a lixiviação com aquecimento por banho assistido por sonicação resultou em uma recuperação de cobalto superior em aproximadamente 58 e 23 % se comparado às recuperações obtidas, respectivamente, pela lixiviação em banho sem efeito de agitação e pela lixiviação realizada com aquecimento em manta térmica com agitação mecânica. Já para o lítio, a recuperação obtida pela lixiviação sob efeito de sonicação foi superior em aproximadamente 37 e 28 % se comparado aos sistemas sem efeito de agitação e com agitação mecânica, respectivamente.

Após as inferências realizadas a partir das observações dos valores apresentados no gráfico da Figuras, foi realizada a análise de variância dos resultados de recuperação de lítio e cobalto obtidos após os testes de lixiviação. A Tabela 2, representa o quadro de ANOVA, sob intervalo de confiança de 95 % dos três sistemas de lixiviação avaliados.

Fonte da variação	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F _{calculado}	p-valor	F _{Tabelado}
Sistemas de Lixiviação	2	3442,82	800423,48	$1,77 \times 10^{-31}$	3,89
Recuperações (Li e Co)	1	282,68	65721,00	$8,35 \times 10^{-24}$	4,75
Interações	2	289,37	67276,47	$5,03 \times 10^{-25}$	3,89
Resíduos	12	0,004			
Total	17				

Tabela 2. Quadro de ANOVA

Realização





Avaliando-se o quadro de ANOVA exposto na Tabela 2, observa-se que há diferença significativa entre pelo menos dois dos tratamentos (sistema de lixiviação), uma vez que o p-valor é menor que o nível de significância (0,05) e o valor $F_{\text{Calculado}}$ é maior que o valor F_{Tabelado} .

A partir desta observação, aplicou-se o Teste de Tukey para verificação de quais tratamentos apresentavam diferenças estatísticas significativas entre si. Assim, consultando-se a Tabela para o Teste de Tukey levando-se em consideração o nível de significância de 5 %, os 12 graus de liberdade dos resíduos e os 3 tratamentos nos quais as amostras foram submetidas, o valor de $q_{5\%; (12, 3)}$ consistiu em 3,77. Considerando-se o valor de quadrado médio para o resíduo apresentado na Tabela 2 (0,004), o DMS calculado foi de 0,14.

A Tabela 3 representa os valores absolutos de diferença entre os pares de média dos tratamentos, considerando a recuperação tanto para o cobalto, quanto para o lítio, obtidos após a lixiviação. Pela análise da Tabela 3, verifica-se que todos os valores absolutos de diferença entre as médias dos tratamentos são maiores que os valor de diferença mínima significativa calculado (DMS = 0,14), o que significa que os sistemas de lixiviação avaliados apresentam resultados significativamente diferentes.

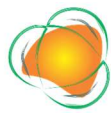
$ \bar{x}_i - \bar{x}_j $	Recuperação de Co	Recuperação de Li
$ \overline{\text{Sonicação}} - \overline{\text{Sem agitação}} $	58,34	37,41
$ \overline{\text{Sonicação}} - \overline{\text{Agitação mecânica}} $	22,78	28,13
$ \overline{\text{Sem agitação}} - \overline{\text{Agitação mecânica}} $	35,56	9,28

Tabela 3. Diferença absoluta entre as médias dos tratamentos

Desta forma, conclui-se que o sistema de lixiviação que contribui para maiores recuperações dos metais de interesse é o sistema composto por aquecimento em banho termostatizado assistido por sonicação. As maiores recuperações obtidas por este sistema de lixiviação podem ser explicadas pelo princípio dos efeitos gerados pela sonicação.

Neste trabalho, o termo sonicação foi empregado para denominar o procedimento de utilização de ondas sonoras de ultrassom sob os sistemas químicos empregados na

Realização



lixiviação. A frequência ultrassônica empregada nos experimentos sob sonicação foi de 40 kHz que se trata de uma baixa frequência, sendo comumente empregada para limpeza, lixiviação e reações químicas com o objetivo de produzir uma alteração química e/ou física permanente no material (HUA et al., 2023).

Essa alteração permanente ocorre devido à cavitação acústica que corresponde a um fenômeno físico gerado pela formação, crescimento e colapso implosivo de bolhas em líquidos irradiados por ultrassom (AGANIN; KHISMATULLINA, 2023). Além do efeito de cavitação, o efeito mecânico e o efeito térmico gerado pelo ultrassom também são benéficos à lixiviação. O efeito mecânico causado pela sonicação promove a troca de material entre sólidos e líquidos já que intensifica o movimento convectivo e a dispersão de sólidos. Além disso, o efeito mecânico é responsável por converter a energia ultrassônica em energia térmica, que promove a reação de lixiviação ácida por ser absorvida pela reação. Semelhantemente, o efeito térmico também promove melhorias na lixiviação. Tal melhoria se deve aos altos gradientes de temperatura causados pelo colapso das bolhas de cavitação, o que se justifica pelo fato de a lixiviação ser altamente dependente da temperatura (JIANG et al., 2018; ZHOU et al., 2022).

Apesar de ter obtido resultados de recuperação superiores sob agitação mecânica no trabalho de Urias et al. (2021), investigar a capacidade do ultrassom a fim de conciliar eficiência de remoção a temperaturas inferiores, representa vantagens com relação também à redução de custo energético, tanto com a manutenção de altas temperaturas, mas também com o sistema elétrico de motor/agitação.

Há estudos também que investigaram a lixiviação sob sonicação como técnica alternativa. Assim como neste trabalho, Li et al. (2023), não somente interessados no emprego do ultrassom, também investigaram a ação de ácido orgânico sob a recuperação de lítio e cobalto, comparando a eficácia do ácido cítrico com o ácido sulfúrico e ácido clorídrico de forma isolada. Além do tipo de ácido, as demais variáveis foram: temperatura (20 a 60 °C), potência do ultrassom (60 a 120 W) e tempo de processo (2 a 6 h). Neste estudo, cuja razão sólido/líquido foi de 25 g/L e empregou-se H₂O₂ (0,55 M) como agente redutor, foi possível recuperar cerca de 96 % de cobalto e praticamente 100 % de lítio provenientes de baterias de íons de lítio usadas, a partir da condição ótima de 2 M de ácido

Realização





cítrico, potência de 90 W, a 60 °C e 5 h de processo.

Em relação à alta razão sólido/líquido, Jiang et al. (2018), também conseguiu alta eficiência de recuperação de lítio e cobalto provenientes das LIBs, empregando 100 g/L. Neste estudo, as melhores condições de processo constituíram-se de 2 M de H₂SO₄, com 5% v/v de H₂O₂, potência de ultrassom de 360 W, tempo de lixiviação de 30 min e temperatura de 30 °C. Nestas condições, foi possível obter recuperação de 91,65 % e 92,70 % de, respectivamente, cobalto e lítio.

De forma geral, verifica-se que o uso de dispositivos que permitem empregar altas potências de ultrassom favorece o aumento da recuperação dos metais de interesse com redução de tempo e temperatura.

CONCLUSÕES

Este trabalho de pesquisa contribuiu para a obtenção de subsídios técnico-científicos de um processo de recuperação dos metais com menor impacto ambiental e menor consumo de reagentes inorgânicos, o que colabora para a economia circular, pois a reciclagem permite a regeneração de áreas onde ocorre o depósito destes lixos eletrônicos, agrega valor ao material descartado, reduz a exploração da fonte primária dos metais e promove o emprego de uma tecnologia sustentável.

Foi possível alcançar os objetivos propostos neste trabalho, sendo listados abaixo os principais resultados:

- Identificou-se que a agitação, seja mecânica ou por meio do uso de ultrassom, promove maiores valores de recuperação de lítio e cobalto, pois favorece a transferência de massa;
- Foi verificado que o sistema de lixiviação empregando-se banho termostático assistido por sonicação promoveu melhores recuperações de lítio e cobalto se comparado aos demais sistemas avaliados (banho termostático sem agitação e aquecimento em manta térmica com agitação mecânica).

Realização





AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG, CAPES, CNPq e à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia.

REFERÊNCIAS

AGANIN, A. A.; KHISMATULLINA, N. A. Influence of the phase interface mass transfer characteristics on the cavitation bubble collapse in water. **Ocean Engineering**, v. 283, p. 115013, 2023.

BOTELHO JUNIOR, A. B. et al. Cobalt Recovery from Li-Ion Battery Recycling: A Critical Review. **Metals**, v. 11, n. 12, p. 1999, 2021.

CHEN, Y. et al. A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards. **Journal of Energy Chemistry**, v. 59, p. 83–99, 2021.

EUROPEAN COMMISSION. **Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020)**. Luxemburgo: Publications Office of the European Union, 2020.

HUA, Y. et al. Humic acid-based interlocked MOF: Enabling stable cycling performance at ultra-high current densities for lithium-ion batteries. **Electrochimica Acta**, v. 455, p. 142422, 2023.

JIANG, F. et al. Ultrasound-assisted leaching of cobalt and lithium from spent lithium-ion batteries. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 48, p. 88–95, 2018.

LI, W. et al. Leaching kinetics of de-lithium residue from spent ternary lithium-ion battery cathodic materials with starch as reductant. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 33, n. 2, p. 619–631, 2023.

LIN, L.; LU, Z.; ZHANG, W. Recovery of lithium and cobalt from spent Lithium- Ion batteries using organic aqua regia (OAR): Assessment of leaching kinetics and global warming potentials. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 167, p. 105416, 2021.

URIAS, P. M. et al. Leaching with mixed organic acids and sulfuric acid to recover cobalt and lithium from lithium ion batteries. **Environmental Technology**, v. 42, n. 25, p. 4027–4037, 2021.

VERMA, A.; CORBIN, D. R.; SHIFLETT, M. B. Lithium and cobalt recovery for lithium-ion battery recycle using an improved oxalate process with hydrogen peroxide. **Hydrometallurgy**, v. 203, p. 105694, 2021.

ZHOU, Y. et al. Comprehensive recovery of NCM cathode materials for spent lithium-ion batteries by microfluidic device. **Separation and Purification Technology**, v. 294, p. 121185, 2022.

Realização

