



Lixiviação de cobre de resíduos de ânodos de baterias íon-lítio utilizando ácido levulínico

Gabriel E. Souza (PG)¹, Luan S. Silva (PG)¹, Vítor M. O. da Silva (IC)¹, Ana M. Ferreira (PQ)², Maria C. Hespanhol (PQ)^{1*}.

¹Grupo de Análise e Educação para a Sustentabilidade (GAES), Departamento de Química, Universidade Federal de Viçosa, Brasil

²Departamento de Química, CICECO, Universidade de Aveiro, Portugal

*mariacarmo@ufv.br

RESUMO

O aumento de resíduos de baterias de íon-lítio (LIBs) é uma preocupação ambiental e de saúde. Por isso, processos hidrometalúrgicos (PH) tradicionais têm sido utilizados para a recuperação de metais desses resíduos. Apesar de eficazes, os PH usam ácidos inorgânicos que liberam gases tóxicos. Neste trabalho, desenvolvemos um processo hidrometalúrgico alternativo e mais ecológico para recuperar cobre de ânodos de LIBs obsoletas, utilizando ácido levulínico como agente de dissolução de metal. Empregamos o delineamento composto central rotacional para realização de um planejamento experimental fatorial, com a concentração máxima de cobre no lixiviado como resposta. Os dados foram analisados por metodologia de superfície de resposta, resultando na condição ótima de lixiviação: razão sólido-líquido de 1:100, $[H_2O_2] = 3\%$ (m/v) e $[HLev] = 3,0 \text{ mol L}^{-1}$, a 40°C por 4 h. Sob essas condições, 100 % de cobre foi dissolvido dos resíduos de bateria íon-lítio. Este processo se mostra uma solução eficiente e sustentável, permitindo a valorização de resíduos de LIBs e a reinserção do cobre na cadeia produtiva.

LIBs, ácido orgânico, hidrometalurgia, sustentabilidade.

Introdução

As baterias do tipo íon-lítio (LIBs) são atualmente a principal fonte de fornecimento de energia, devido a sua alta capacidade de armazenamento de energia e seu baixo custo de produção, sendo utilizadas como componentes eletrônicos, como celulares ou baterias para carros elétricos (1).

Estruturalmente, uma LIB possui ânodo, cátodo, eletrólito separador e capa externa podendo diferentes metais serem utilizados para a sua produção, o que configura a elas diferentes propriedades como potencial energético, segurança, vida útil e custo de produção. Dentre os metais é possível encontrar como parte de sua composição metais como cobalto, lítio, cobre, alumínio, níquel, manganês e ferro distribuídos na bateria a depender de seu fabricante (2).

No ânodo, o cobre funciona como coletor de corrente, que durante o carregamento da bateria, os íons lítio se alocam entre o grafite revestido nas folhas de cobre, configurando o fator determinante para o potencial energético da bateria (3).

Com o crescente aumento na produção das LIBs, surge uma preocupação iminente com o seu descarte, já que o desgaste natural as transforma em resíduos ricos em metais críticos que se não forem descartados adequadamente, podem gerar sérios riscos de contaminação ambiental (4).

Atualmente, a reciclagem desses resíduos utiliza principalmente processos pirometalúrgicos, que empregam tratamento térmico para a formação de ligas metálicas, e processos

hidrometalúrgicos, que envolvem o uso de solventes inorgânicos para a lixiviação e separação dos metais, sendo que ambos podem ser aplicados de forma isolada ou conjugada (4).

O uso de solventes inorgânicos na lixiviação de metais tem desvantagens claras: eles liberam gases tóxicos e poluentes, o que gera riscos significativos ao meio ambiente e à saúde. Por isso, as pesquisas têm focado em alternativas mais seguras, como os ácidos orgânicos, que representam um risco muito menor. Ácidos como o cítrico e o tartárico já são documentados na literatura como solventes eficazes para o tratamento de resíduos eletrônicos (5). Visando uma alternativa verde em relação aos ácidos inorgânicos, foi proposto a dissolução de ânodos de baterias íon-lítio usando o ácido levulínico como solvente.

Experimental

Preparo dos resíduos dos ânodos

Os resíduos de baterias descartadas foram coletados de locais de armazenamento de lixo eletrônico. As baterias foram descarregadas e desmontadas, separando o ânodo dos outros componentes. O cobre em formato de folhas revestidas com grafite A Figura 1 mostra o fluxograma do procedimento adotado para a limpeza dos ânodos coletados, primeiramente o grafite foi raspado das folhas de cobre usando uma espátula. Em seguida, as folhas raspadas foram submersas em água deionizada e levadas a um banho de ultrassom por 30 min. Repetindo-se este procedimento por 3 vezes. Por fim, as folhas de cobre foram secas em estufa a 45°C por 3 h e cortadas em quadrados de $1 \times 1 \text{ cm}$.



Figura 1. Fluxograma do processo de limpeza das folhas de cobre.

A condição experimental foi otimizada através de um planejamento experimental fatorial de 2k, onde k é o número de variáveis igual a 3. As variáveis estudadas foram razão sólido-líquido (1:25 a 1:100), concentração de ácido levulínico (0,15 a 3,8 mol L⁻¹) e concentração de peróxido de hidrogênio (1,0 a 4,0 % (m/v)). A temperatura e o tempo foram mantidos constantes e iguais a 40 °C e 4 h, respectivamente.

Resultados e Discussão

O planejamento experimental resultou em 17 ensaios. Cada um deles foi realizado e quantificado por espectrometria de absorção atômica por chama (FAAS), com os dados resultantes foram analisados por um delineamento composto central rotacional (DCCR). A Tabela 1 apresenta o planejamento experimental proposto e os resultados das quantificações dos experimentos.

Foi possível observar que a adição de peróxido de hidrogênio foi essencial para a lixiviação, pois como um agente fortemente oxidante ele contribuiu para a dissolução do cobre ao ser associado com ácido levulínico aumentando a eficiência da lixiviação, visto que o apenas o ácido possui propriedades redutoras, assim não conseguindo realizar a completa dissolução do cobre durante a lixiviação (6).

Para analisar os dados do planejamento experimental, usamos a metodologia de superfície de resposta. Essa abordagem nos permite entender com precisão como cada fator influencia o resultado, desenvolvendo um modelo matemático que considera efeitos principais, quadráticos e as interações entre dois fatores (7). A Tabela 2 detalha a condição ótima prevista pelo planejamento.

Conclusões

O processo proposto possibilita que o cobre seja 100 % dissolvido a partir dos resíduos de ânodos das baterias íon-lítio, utilizando uma temperatura branda e o ácido levulínico que é classificado como um bio-solvente. Assim, foi possível obter cobre de uma fonte secundária utilizando um processo sustentável contribuindo para a valorização do resíduo de baterias com a possibilidade da reintrodução do cobre em um novo ciclo produtivo.

Tabela 1. Ensaios referentes ao planejamento experimental e resultados de teor de cobre após lixiviação dos ânodos.

Ensaio	Razão S/L	CH _{Lev} / mol L ⁻¹	CH _{2O2} / % (m/v)	Teor de cobre lixiviado do ânodo % (m/m)
1	0,02	0,9	1,6	66,68
2	0,03	0,9	1,6	43,55
3	0,02	3,1	1,6	91,86
4	0,03	3,1	1,6	56,74
5	0,02	0,9	3,4	87,57
6	0,03	0,9	3,4	84,35
7	0,02	3,1	3,4	86,90
8	0,03	3,1	3,4	88,01
9	0,01	2,0	2,5	96,50
10	0,04	2,0	2,5	72,61
11	0,03	0,2	2,5	27,83
12	0,03	3,8	2,5	91,20
13	0,03	2,0	1,0	43,50
14	0,03	2,0	4,0	94,60
15	0,03	2,0	2,5	87,77
16	0,03	2,0	2,5	83,08
17	0,03	2,0	2,5	88,43

Tabela 2. Condição ótima prevista pelo planejamento experimental no tempo de 4 horas e temperatura de 40 °C.

Razão S/L	C _{HLev} / mol L ⁻¹	C _{H2O2} / % (m/v)	Teor de cobre lixiviado do ânodo % (m/m)
1:100	3,0	3,0	100

Agradecimentos



Referências

- Lima, M, et al. Energies. **2022**. 15. 6. 2203
- Dai, H, et al. Renewable and Sustainable Energy Reviews. **2021**. 138
- Winslkow, K, et al. Resources, Conservation and Recycling. **2018**. 129. 263-277
- Pinto, J et al. Environmental Science and Pollution Research. **2023**. 23071
- Rezaei, M, et al. Journal of Power Sources. **2025**
- Jiang, T, et al. Heliyon,. **2023**, 9, 5.
- Bezerra, M.A, et. al. Talanta. **2008**.