

DEIONIZAÇÃO CAPACITIVA POR FLUXO (FCDI) PARA A RECUPERAÇÃO DE ÍONS LÍTIO DE LIXIVIADO DE BATERIAS

Paloma S. Marques – PPGE3M - UFRGS, Amanda Pioner – EE - UFRGS,
Alexandre Giacobbo – PPGQTA - FURG, Andrea Bernardes – PPGE3M - UFRGS

Resumo: O crescimento acelerado da demanda por baterias de íons de lítio (LIBs), impulsionado pela expansão dos veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia, tem intensificado a necessidade de desenvolvimento de tecnologias sustentáveis para recuperação de lítio a partir de baterias em fim de vida útil. Nesse contexto, a deionização capacitiva com fluxo de eletrodo (FCDI) destaca-se como uma alternativa promissora devido à sua operação contínua, baixo consumo energético e potencial de seletividade iônica. O presente trabalho teve como objetivo projetar, construir e avaliar experimentalmente um protótipo de célula FCDI para recuperação de íons lítio em solução aquosa de sulfato de lítio. A célula foi desenvolvida com adaptações estruturais em relação a modelos reportados na literatura, empregando placas coletoras de corrente em aço inoxidável associadas a estruturas de acrílico usinadas para circulação da pasta de carvão ativado. Os experimentos foram conduzidos em circuito fechado utilizando solução de Li_2SO_4 na concentração de $1,5 \text{ gL}^{-1}$, com tempos de operação de 4 e 8 horas. O desempenho do sistema foi monitorado por meio de medições de condutividade elétrica, pH e análises de ICP-OES para quantificação da concentração de lítio. Os resultados indicaram reduções de concentração de Li^+ de 43,77% e 42,70% após 4 e 8 horas de operação, respectivamente. Embora inferiores aos valores frequentemente reportados para sistemas FCDI otimizados, os resultados confirmam a viabilidade da célula desenvolvida para promover a remoção de íons lítio da solução. Os dados obtidos evidenciam a necessidade de otimização de parâmetros operacionais e de materiais eletroativos, contribuindo para o avanço da aplicação da FCDI na recuperação sustentável de lítio proveniente de lixiviado de baterias.

Palavras-chave: Recuperação de lítio; Baterias de íons de lítio; Deionização Capacitiva com Fluxo de Eletrodo; FCDI; Reciclagem de LIBs.

Realização



Apoio Institucional



REBOB

Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

FLOW CAPACITIVE DEIONIZATION (FCDI) FOR THE RECOVERY OF LITHIUM IONS FROM BATTERY LEACHATES

Paloma S. Marques – PPGE3M - UFRGS, Amanda Pioner – EE - UFRGS,
Alexandre Giacobbo – PPGQTA - FURG, Andrea Bernardes – PPGE3M - UFRGS

Abstract: The rapid growth in demand for lithium-ion batteries (LIBs), driven by the expansion of electric vehicles and energy storage systems, has intensified the need for sustainable technologies for lithium recovery from end-of-life batteries. In this context, Flow Electrode Capacitive Deionization (FCDI) has emerged as a promising alternative due to its continuous operation, low energy consumption, and potential for ionic selectivity. This study aimed to design, construct, and experimentally evaluate an FCDI cell prototype for the recovery of lithium ions from an aqueous lithium sulfate solution. The cell was developed with structural modifications compared to models reported in the literature, employing stainless steel current collectors combined with machined acrylic structures to enable activated carbon slurry circulation. Experiments were conducted in a closed-loop system using a Li_2SO_4 solution at a concentration of 1.5 g L^{-1} , with operating times of 4 and 8 hours. System performance was monitored through measurements of electrical conductivity, pH, and ICP-OES analyses for lithium concentration quantification. The results showed Li^+ concentration reductions of 43.77% and 42.70% after 4 and 8 hours of operation, respectively. Although lower than the values commonly reported for optimized FCDI systems, the results confirm the feasibility of the developed cell for promoting lithium ion removal from solution. The obtained data highlight the need for optimization of operational parameters and electroactive materials, contributing to the advancement of FCDI applications for the sustainable recovery of lithium from battery leachates.

Keywords: Lithium recovery; Lithium-ion batteries; Flow Capacitive Deionization; FCDI; LIB recycling.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

1. INTRODUÇÃO

À medida que o mundo avança rumo ao uso de energia limpa e/ou de fontes renováveis, cresce também a demanda de Lítio (dos Santos et al. 2020). Nesse contexto, as baterias de íons de lítio (LIBs) tornaram-se indispensáveis para as tecnologias modernas de armazenamento de energia, estando presentes em aparelhos eletrônicos, veículos elétricos e até em sistemas de apoio a fontes renováveis (Rezaei et al. 2025). Apelidado de “ouro branco” por sua demanda e escassez, a estimativa é que o uso de Lítio aumente em 170.000 toneladas até 2030 (European Commission. Joint Research Centre. 2018).

Os diversos tipos de baterias íon-lítio existentes diferem-se em suas propriedades e, por isso, são utilizadas em diferentes aplicações. O material ativo do cátodo é um dos principais modificadores das propriedades da bateria e, por esse motivo, a composição do material ativo do cátodo é, também, o que dá o nome ao tipo de bateria (Domingues e De Souza 2024).

Concomitante ao crescimento do uso de LIBs e, consequentemente, de Lítio, surge uma nova preocupação: o descarte e tratamento correto para esse tipo de resíduo (Qureshi et al. 2026). As baterias utilizadas em carros elétricos, por exemplo, têm um tempo de vida útil médio de 10 anos, ou seja: nas próximas décadas haverá um volume considerável de baterias degradadas (W. Gao et al. 2024).

Visando um desenvolvimento sustentável e favorável ao meio ambiente, busca-se ampliar cada vez mais a adoção de práticas para uma economia circular (ISO 2026). Nesse contexto, a reciclagem de baterias de íon-lítio torna-se uma alternativa para alcançar o desenvolvimento sustentável e a redução dos impactos ambientais associados ao descarte inadequado (W. Gao et al. 2024). Além da mitigação de impactos ambientais, a reciclagem de LIBs permite a recuperação de metais estratégicos, como lítio, cobalto e níquel, agregando valor econômico ao processo e reduzindo a dependência de mineração primária.

As principais rotas empregadas na reciclagem de baterias de íon-lítio são a pirometalurgia e a hidrometalurgia (Winslow et al. 2018). A rota pirometalúrgica utiliza temperaturas superiores a 1000°C para converter os materiais das baterias em ligas metálicas e escórias, permitindo o processamento de grandes volumes de resíduos com diferentes composições (Qureshi et al. 2026). Entretanto, apresenta elevado consumo energético, emissão de poluentes atmosféricos e necessidade de etapas adicionais para o refino dos metais recuperados, o que limita sua aplicação em larga escala (Qureshi et al. 2026).

A hidrometalurgia surge como uma alternativa mais sustentável, operando em temperaturas inferiores a 200 °C (Haocheng Ji et al., s.d.). Nesse processo, a lixiviação promove a solubilização dos metais utilizando ácidos orgânicos ou inorgânicos, frequentemente associados a agentes redutores, como o peróxido de hidrogênio (Jia et al. 2018; Shin et al. 2005). Embora apresente elevadas eficiências de extração de lítio, frequentemente superiores a 90%, a composição final dos lixiviados depende das características da bateria e das condições operacionais empregadas (Liberati et al. 2025). Como consequência, são geradas soluções multicomponentes contendo diversos metais e ânions, tornando a separação seletiva do lítio um desafio significativo (P. M. Tembo et al. 2024).

Realização



Apoio Institucional



REBOB

Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Devido à elevada complexidade química desses lixiviados, diferentes técnicas têm sido empregadas para a recuperação do lítio, incluindo precipitação química, extração por solvente, troca iônica e adsorção seletiva (Hemant Mittal et al. 2026). A precipitação é amplamente utilizada por sua simplicidade operacional e baixo custo, porém apresenta limitações relacionadas à baixa seletividade e à necessidade de remoção prévia de metais de transição para obtenção de produtos de alta pureza (Xianlai Zeng et al. 2014; Zhai et al. 2026). Já a extração por solvente é eficiente na separação de metais como cobalto e níquel, mas sua aplicação direta ao lítio é dificultada pela elevada hidratação desse íon e sua baixa tendência à formação de complexos (Nguyen e Lee 2018; Basudev Swain 2016).

As técnicas de troca iônica e adsorção seletiva utilizam materiais capazes de adsorver preferencialmente o lítio, mesmo na presença de outros cátions em solução (Xu et al. 2016). Apesar da maior seletividade, fatores como estabilidade dos materiais e necessidade de regeneração ainda representam desafios para sua aplicação industrial (Yücel e Yörükoğlu 2024). Dessa forma, o desenvolvimento de tecnologias alternativas mais seletivas e sustentáveis, incluindo processos eletroquímicos, tem recebido crescente atenção para a recuperação eficiente de lítio a partir de lixiviados de baterias.

A eletrodialise (ED) é uma tecnologia de separação baseada na migração seletiva de íons através de membranas de troca iônica sob a ação de um campo elétrico (Winslow et al. 2018). A técnica apresenta vantagens como baixa geração de resíduos e reduzido consumo energético quando aplicada a soluções de baixa a média concentração, sendo utilizada para separação de espécies iônicas em diferentes processos industriais (Haocheng Ji et al., s.d.; Lee, Hyunseok et al. 2023). Entretanto, sua eficiência é limitada em soluções mais concentradas devido ao aumento do consumo energético e à necessidade de manutenção frequente das membranas, que podem sofrer degradação e incrustação ao longo da operação (Calvert, Giles et al. 2019; Chinmay Leena Ajit Patade et al. 2025).

Entre as tecnologias eletroquímicas derivadas, destaca-se a deionização capacitiva (CDI), que promove a remoção de íons por eletroadsorção em eletrodos porosos de carbono submetidos a uma diferença de potencial elétrico (Shuai et al. 2025; Shin et al. 2005). A CDI apresenta baixo consumo energético e baixa geração de resíduos, além da possibilidade de recuperação parcial de energia durante os ciclos de adsorção e dessorção (Liberati et al. 2025; P. M. Tembo et al. 2024; Meshram et al. 2014; Hemant Mittal et al. 2026). Contudo, a necessidade de regeneração periódica dos eletrodos e a redução da eficiência em soluções mais concentradas limitam sua aplicação prática.

Como evolução da CDI, a deionização capacitiva assistida por membranas (MCDI) incorpora membranas de troca iônica junto aos eletrodos, aumentando a seletividade e a eficiência de remoção de íons (Basudev Swain 2016). As membranas reduzem o retorno de coíons à solução durante os ciclos operacionais e ampliam a capacidade de armazenamento iônico do sistema (Zhai et al. 2026; Nguyen e Lee 2018). Apesar dessas melhorias, a MCDI ainda depende da regeneração dos eletrodos fixos e está sujeita ao desgaste das membranas e à ocorrência de fouling, especialmente em operações prolongadas (Basudev Swain 2016).

Realização



Apoio Institucional



REBOB

Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br

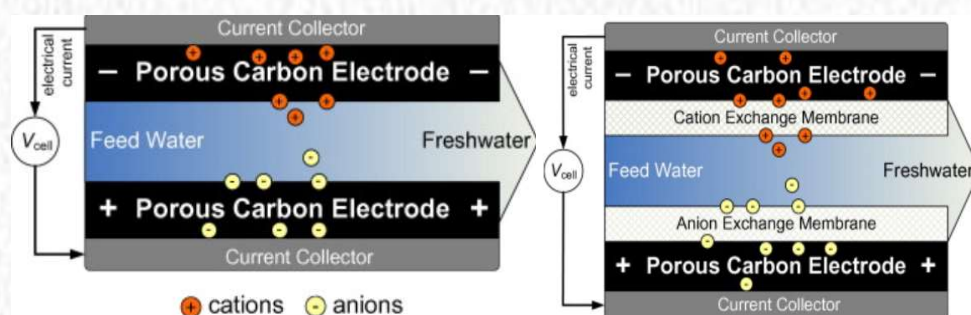


www.abes-rs.org.br

Buscando superar essas limitações, foi desenvolvida a deionização capacitiva com fluxo de eletrodo (FCDI), na qual os eletrodos sólidos são substituídos por suspensões fluidas de carbono circulantes (Calvert, Giles et al. 2019). Essa configuração permite a regeneração dos eletrodos fora da célula, possibilitando operação contínua e maior escalabilidade do processo. Além disso, a elevada área superficial dos eletrodos fluidos permite o tratamento tanto de soluções diluídas quanto concentradas, ampliando significativamente a faixa operacional da tecnologia (Meshram et al. 2014). Dessa forma, a FCDI combina vantagens importantes, como operação contínua, maior flexibilidade operacional, elevada capacidade de adsorção e potencial para recuperação seletiva de íons de interesse (Xu et al. 2016; Yücel e Yörükoğlu 2024).

A recuperação seletiva de lítio permanece um desafio devido às suas características físico-químicas particulares. Embora apresente pequeno raio iônico, o Li^+ possui elevada energia de hidratação, formando uma camada hidratada estável que dificulta sua adsorção e separação (Fadillah et al. 2025; Ma et al. 2023). Além disso, sua concentração geralmente é inferior à de outros cátions presentes em salmouras e lixiviados, como Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , que competem pelos mesmos sítios de adsorção (Chan et al. 2022). Nesse contexto, a FCDI apresenta vantagens por combinar transporte eletroquímico, membranas seletivas e a possibilidade de utilização de materiais funcionalizados capazes de favorecer a captura de Li^+ em relação a outros íons (Park et al. 2025; Martí-Calatayud et al. 2014; Macedo et al., s.d.). Somada à operação contínua e à redução das limitações difusionais, essa característica torna a FCDI uma tecnologia promissora para a recuperação seletiva de lítio a partir de soluções multicomponentes complexas (M. Gao e Chen 2024; Kim et al. 2016). As figuras 1 e 2 ilustram o funcionamento de uma célula de CDI, MCDI e FCDI, respectivamente (Porada et al. 2013; Valmir dias dos Santos e Jairo José Pedrotti 2021).

Figura 1- Esquema de uma configuração convencional de célula CDI/MCDI.



Fonte: Porada et al. (2013).

Realização



Apoio Institucional



REBOB

Correalizadores



(51) 999330700

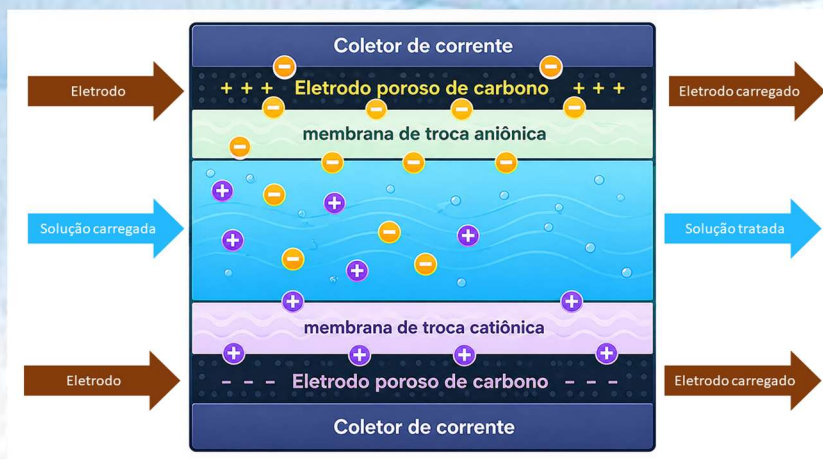


abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Figura 2 - Ilustração esquemática do funcionamento de uma célula FCDI.



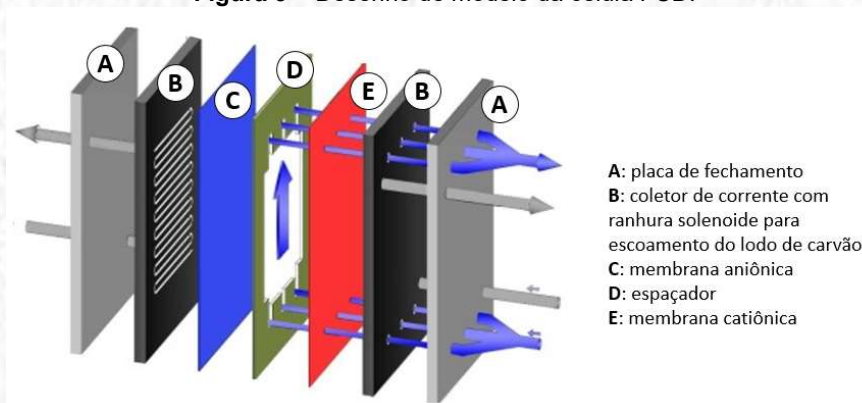
Fonte: Adaptado de Santos e Pedrotti (2021).

2. METODOLOGIA

2.1 Construção do protótipo

O primeiro passo para a realização do estudo consistiu no desenho, modelagem e construção da célula FCDI. O projeto da célula foi baseado no modelo proposto por Dehghan, Mirbagheri e Alam (2022), apresentado na Figura 3, tendo sido submetido a algumas adaptações.

Figura 3 - Desenho de modelo da célula FCDI



Fonte: Dehghan, Mirbagheri e Alam (2022, p. 5179).

Realização



Correalizadores



Apoio Institucional



(51) 999330700



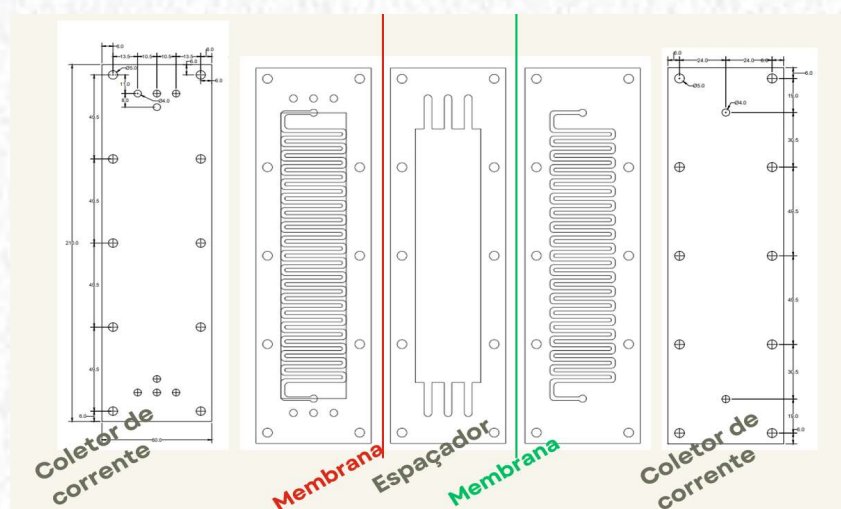
abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Como mostra a Figura 3, a célula de FCDI consistia em sete placas: uma placa de coletor de corrente com cavidade estreita de forma senoidal para fluxo do lodo (B), uma membrana de troca aniônica (C), um espaçador (D), uma membrana de troca catiônica (E), mais uma placa de coletor de corrente idêntica à primeira (B) e duas placas apenas para fechamento da célula nas extremidades (A). A célula desenvolvida neste trabalho foi baseada em um modelo previamente existente, porém com modificações estruturais. As placas de fechamento foram removidas e as placas coletoras de corrente originalmente com ranhuras foram substituídas por um novo conjunto, composto por placas lisas de aço inoxidável acopladas a placas de acrílico vazadas. Nesse arranjo, as placas de aço inoxidável desempenham a função de coletoras de corrente, enquanto as placas de acrílico conferem suporte estrutural ao sistema e possibilitam a circulação do lodo de carvão. A adaptação do modelo foi realizada com o objetivo de otimizar a viabilidade técnica e econômica do processo de confecção das chapas. Nesse contexto, optou-se pela utilização do acrílico, em razão de seu menor custo e maior facilidade de usinagem, características que contribuem para a simplificação das etapas produtivas e para a redução dos custos envolvidos. O projeto adaptado foi modelado no software AutoCAD versão 2025 (Figura 4) e posteriormente usinado.

Figura 4 - Projeto para a construção da célula FCDI.



Fonte: Os autores (2026).

As chapas de inoxidável foram encomendadas de fornecedor externo conforme cotas pré-estabelecidas para encaixe de parafusos para fixação da célula. As chapas de acrílico foram confeccionadas em um equipamento de corte a laser. A Figura 5 demonstra as peças da célula desmontada (da esquerda para a direita: placa coletora de corrente, acrílico com corte solenoide para escoamento da pasta, membrana aniônica (AEM), espaçador, membrana catiônica (CEM), acrílico com corte solenoide para escoamento da pasta e coletor de corrente).

Realização



Correalizadores



Apoio Institucional

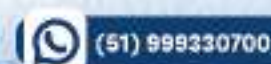
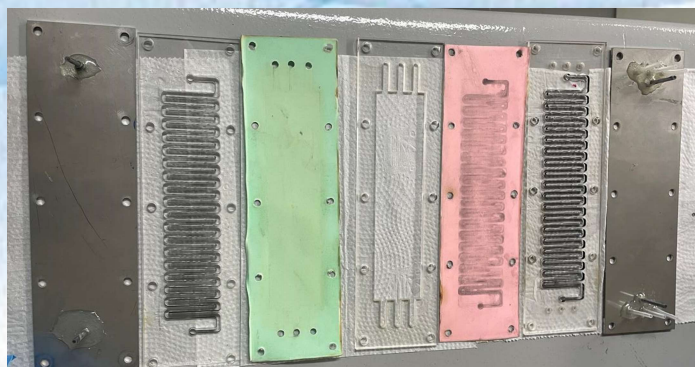


Figura 5 - Célula FCDI desmontada.



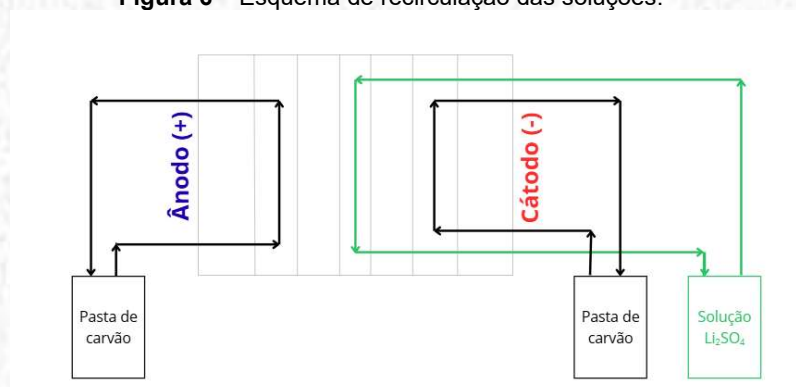
Fonte: Os autores (2026).

As dimensões das placas (40mm de largura x 160mm de altura), bem como a escolha de uma geometria horizontal e diâmetro de 2mm para o caminho de escoamento do lodo (pasta de carvão ativado), seguiram o modelo proposto no estudo elaborado por Saif *et al.* (2024), que avaliaram a melhor condição para o escoamento eficiente dos líquidos dentro da célula, prevenindo as incrustações dentro do sistema.

2.2. Experimentos de recuperação de Lítio

Foram realizados testes em circuito fechado, utilizando recirculação de 50 mL da solução concentrada e 200 mL de lodo tanto no cátodo quanto no ânodo. Estes parâmetros de operação estão baseados no trabalho realizado por Saif *et al.* (2024). A figura 6 ilustra de forma esquemática o sistema de recirculação do protótipo.

Figura 6 – Esquema de recirculação das soluções.



Fonte: Os autores (2026).

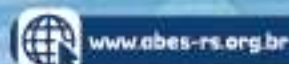
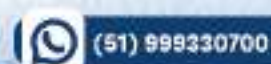
Realização



Correalizadores



Apoio Institucional



Os experimentos foram conduzidos com uma solução de concentração 1,5g/L de Li_2SO_4 durante o período de 4 e 8h. Os parâmetros de vazão e concentração de carvão ativado utilizados na preparação da pasta foram definidos com base na literatura, conforme Crespo et al. (2024). Os dados podem ser visualizados na tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros dos experimentos de deionização por FCDI.

Solução	Composição	Vazão (mL/min)	Volume (mL)
Alimentação	Solução aquosa: 1,5g/L de Li_2SO_4	10	50
Eletrodo/Cátodo	Suspensão aquosa 10g carvão + 0,2g Li_2SO_4	60	200
Eletrodo/Ânodo	Suspensão aquosa 10g carvão + 0,2g Li_2SO_4	60	200

Fonte: Os autores (2026).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O acompanhamento dos experimentos foi realizado por meio de medições de condutividade da solução de Li_2SO_4 e das suspensões, ambas com concentrações e condutividades iniciais previamente conhecidas. Como a solução da alimentação era composta apenas por água e Li_2SO_4 , a redução de sua condutividade ao longo do processo — medida a cada 15 minutos — indicava a diminuição da concentração iônica, evidenciando a remoção dos íons. De forma complementar, a pasta de carvão, também preparada com concentração conhecida, deveria apresentar aumento de condutividade ao longo do tempo, já que era a responsável por reter os íons provenientes da solução concentrada. Além disso, o pH da solução de sulfato de lítio foi medido a cada 30 minutos, afim de verificar que apenas reações de transferência de íons ocorriam, ou seja, não havia processo de redução/oxidação, que são processos indesejados dentro do sistema. As figuras 7, 8 e 9 apresentam, respectivamente, a variação da condutividade ao longo do tempo da solução salina, da pasta de carvão recirculada no ânodo e da pasta de carvão recirculada no cátodo.

Realização



Correalizadores



Apoio Institucional

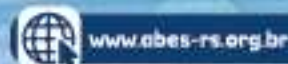
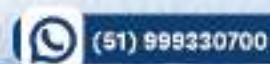


Figura 7 - Variação da condutividade na solução de alimentação durante os experimentos (a) de 4h e (b) de 8 h.

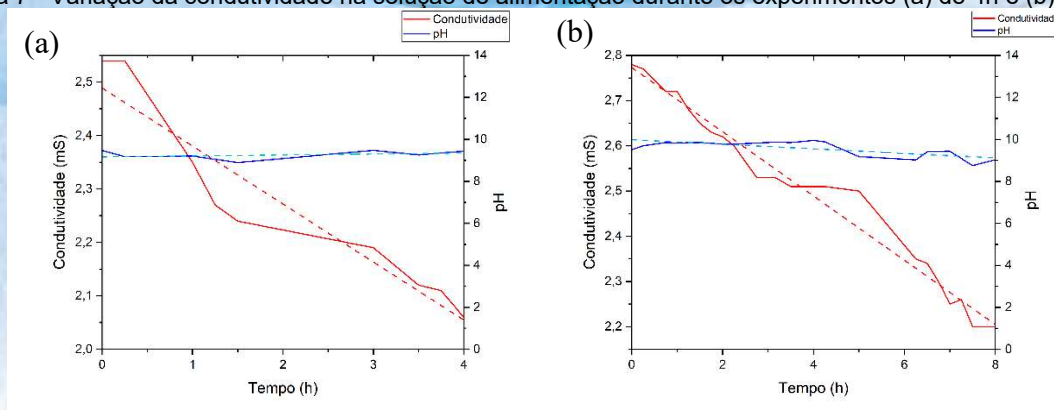


Figura 8 - Variação da condutividade na pasta de carvão no ânodo durante os experimentos (a) de 4h e (b) 8 h.

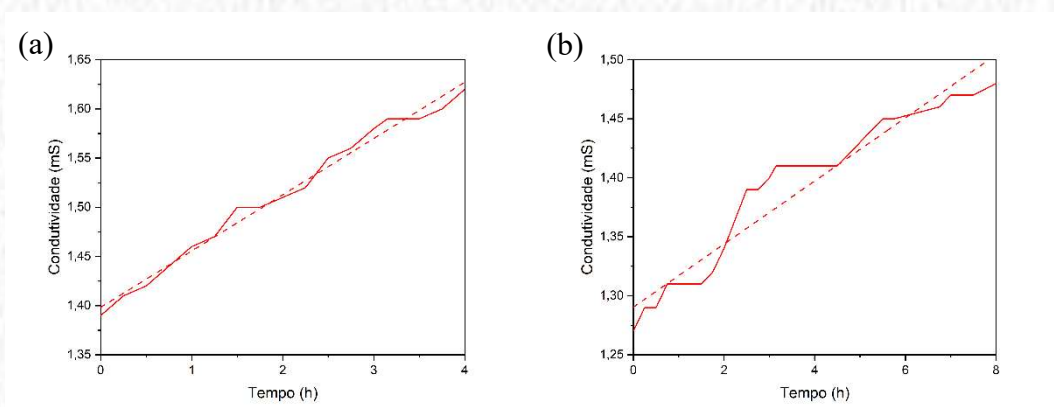
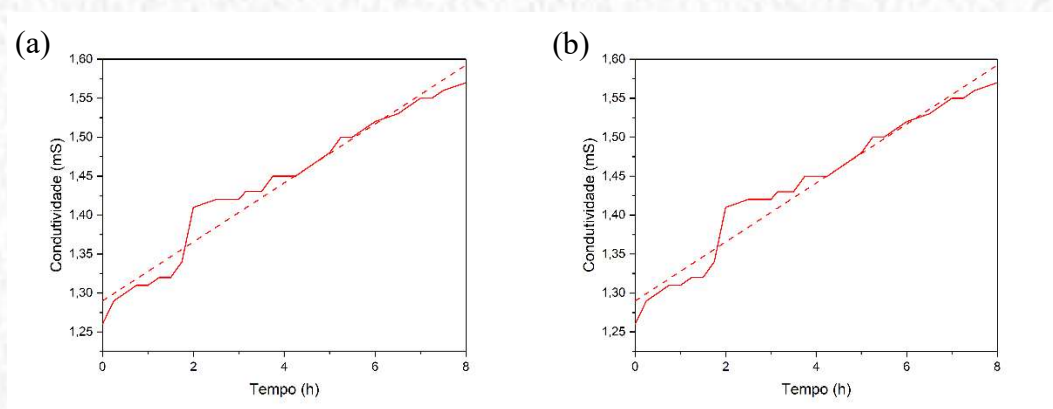


Figura 9 - Variação da condutividade na pasta de carvão no cátodo durante os experimentos (a) de 4h e (b) 8 h.



Fonte: Os autores (2026).

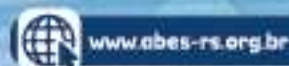
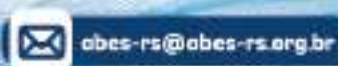
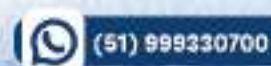
Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



Ao término de cada experimento, as alíquotas das soluções de Li_2SO_4 — tanto da amostra inicial quanto da final — foram submetidas à análise por ICP-MS (Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado). Essa análise teve como objetivo determinar a concentração de íons sódio (Li^+), permitindo quantificar de forma precisa a quantidade de Li^+ e, consequentemente, de Li_2SO_4 presente em cada solução. A tabela 2 demonstra os resultados das análises:

Tabela 2 - Resultados das análises de ICP-OES.

Experimento	Concentração Inicial (ppm de Li^+)	Concentração Final (ppm de Li^+)	Redução da concentração (%)
4 horas	184,35	103,66	43,77
8 horas	184,35	105,64	42,70

Fonte: Os autores (2026).

A redução da concentração de sal esperada em sistemas laboratoriais de dessalinização capacitiva por fluxo alcança, geralmente, valores de remoção de íons entre 70 e 95% (Halder et al., 2025). Comparando aos valores de dessalinização, o desempenho da célula estaria abaixo, porém, mesmo que o Li^+ e o Na^+ (ion estudado em processos de dessalinização) possuam algumas propriedades em comum, ainda podem comportar-se de forma diferente dentro do sistema, sendo necessária uma análise mais aprofundada para avaliação dos resultados. Ainda assim, o desempenho da célula pode ser melhorado com adaptações de parâmetros operacionais do sistema e com a utilização combinada de materiais avançados de eletrodo, como demonstram diversos estudos realizados com variadas configurações, geometrias e materiais de eletrodos utilizados na FCDI, (Saif et al., 2025)

O estudo conduzido por Luo et al. (2020) avaliou o desempenho de cinco diferentes modos operacionais para uma célula de FCDI e demonstrou que o ICC (Ciclo Fechado Isolado) está entre as configurações menos eficientes. Considerando que esse foi o modo adotado neste trabalho, esse fator se configura como mais um parâmetro relevante que pode ter contribuído para os resultados abaixo do esperado. Ainda no estudo de Luo, é possível observar que a célula apresenta dimensões maiores (aproximadamente o dobro de largura) do que as utilizadas e um material de eletrodo composto por 5% de carvão ativado, 1% de negro de fumo e uma concentração maior de eletrólito, resultando em uma pasta com propriedades distintas às utilizadas neste estudo.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi projetada, construída e avaliada uma célula de deionização capacitiva com fluxo de eletrodo (FCDI) voltada à recuperação de íons lítio em solução de sulfato de lítio. A adaptação do projeto original permitiu a construção de um protótipo funcional utilizando materiais de menor custo e maior facilidade de fabricação, demonstrando a viabilidade técnica da configuração proposta.

Os experimentos realizados em circuito fechado evidenciaram a capacidade do sistema em promover a remoção de íons Li^+ da solução de alimentação, alcançando reduções de concentração de 43,77% e 42,70% após 4 e 8 horas de operação, respectivamente. Os resultados de condutividade e as

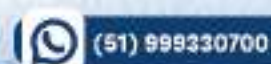
Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



análises por ICP-OES confirmaram a transferência de íons da solução para os eletrodos fluidos, validando o princípio de funcionamento da célula desenvolvida.

Embora os percentuais de remoção obtidos sejam inferiores aos relatados na literatura para sistemas FCDI mais avançados, diversos fatores podem ter influenciado o desempenho observado, incluindo as dimensões da célula, a composição da pasta de eletrodo, a concentração do eletrólito e o modo operacional adotado. Dessa forma, os resultados obtidos devem ser interpretados como uma etapa inicial de validação experimental da tecnologia.

Como perspectivas futuras, recomenda-se a otimização dos parâmetros operacionais, a avaliação de diferentes composições de eletrodos fluidos, a investigação de materiais adsorventes com maior seletividade ao lítio e a aplicação do sistema em soluções multicomponentes que simulem lixiviados reais de baterias de íons de lítio. Tais estudos poderão contribuir para aumentar a eficiência do processo e consolidar a FCDI como uma alternativa promissora para a recuperação sustentável de lítio em processos de reciclagem de baterias.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro recebido da CAPES, CNPq, FAPERGS e FINEP.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

6. REFERÊNCIAS

Basudev Swain. 2016. "Separation and purification of lithium by solvent extraction and supported liquid membrane, analysis of their mechanism: a review". Pt. 10. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 91: 2549–62.

Calvert, Giles, Kaksonen, Anna H., Cheng, Ka Yu, Van Yken, Jonovan, Chang, Barbara, e Boxall, Naomi J. 2019. "Recovery of Metals from Waste Lithium Ion Battery Leachates Using Biogenic Hydrogen Sulfide". *Minerals* 9 (9): 563. <https://doi.org/10.3390/min9090563>.

Chan, Ka Ho, Monu Malik, e Gisele Azimi. 2022. "Separation of lithium, nickel, manganese, and cobalt from waste lithium-ion batteries using electrodialysis". *Resources, Conservation and Recycling* 178 (março): 106076. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106076>.

Chinmay Leena Ajit Patade, Akshat Raj Sharma, Vinod Kumar Nigam, e Muthu Kumar Sampath. 2025. *Chapter Eleven – Recovery of Lithium and Lead Ions from Battery Industry Wastes Using Advanced Separation Techniques*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21884-2.00007-1>.

Domingues, Ana Mariele, e Ricardo Gabbay De Souza. 2024. "Review of Life Cycle Assessment on Lithium-Ion Batteries (LIBs) Recycling". *Next Sustainability* 3: 100032. <https://doi.org/10.1016/j.nxsust.2024.100032>.

European Commission. Joint Research Centre. 2018. *Cobalt: Demand Supply Balances in the Transition to Electric Mobility*. Publications Office. <https://doi.org/10.2760/97710>.

Fadillah, Ganjar, Rahmat Hidayat, Anggi Saputra, et al. 2025. "Advanced electrodialysis techniques for analytical separation: A comprehensive review". *Analytica Chimica Acta* 1380 (dezembro): 344637. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2025.344637>.

Gao, Ming, e Wenqing Chen. 2024. "Engineering strategies toward electrodes stabilization in capacitive deionization". *Coordination Chemistry Reviews* 505 (abril): 215695. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.215695>.

Gao, Wei, Zhi Cao, Naser Vosoughi Kurdkandi, Yuhong Fu, e Chirs Mi. 2024. "Evaluation of the second-life potential of the first-generation Nissan Leaf battery packs in energy storage systems". *eTransportation* 20 (maio): 100313. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2024.100313>.

Haocheng Ji, Junxiong Wang, Jun Ma, Hui-Ming Cheng, e Guangmin Zhou. s.d. *Fundamentals, status and challenges of direct recycling technologies for lithium ion batteries - Chemical Society Reviews (RSC Publishing)*. Acesso em 19 de maio de 2026. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2023/cs/d3cs00254c>.

Hemant Mittal, Syed Nasir Shah, Maryam Alsuwaidi, e Akram Alfantazi. 2026. "Lithium Recovery from Brines: A Comprehensive Review of Advanced Separation Technologies". *Precision Chemistry*, abril 6. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/prechem.5c00264>.

ISO (ISO). 2026. "Economía circular". <https://www.iso.org/es/sectores/medioambiente/economia-circular>.

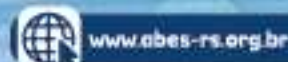
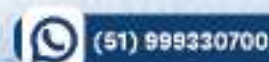
Realização



Correalizadores



Apoio Institucional



Jia, Fu, Laura Zuluaga-Cardona, Adrian Bailey, e Ximena Rueda. 2018. "Sustainable supply chain management in developing countries: An analysis of the literature". *Journal of Cleaner Production* 189 (julho): 263–78. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.248>.

Kim, Taeyoung, Jihyun Yu, Choonsoo Kim, e Jeyong Yoon. 2016. "Hydrogen peroxide generation in flow-mode capacitive deionization". *Journal of Electroanalytical Chemistry* 776 (setembro): 101–4. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2016.07.001>.

Lee, Hyunseok, Kim, Yu-Tack, e Lee, Seung-Woo. 2023. "Optimization of the Electrochemical Discharge of Spent Li-Ion Batteries from Electric Vehicles for Direct Recycling". *Energies* 16 (6). <https://doi.org/10.3390/en16062759>.

Liberati, Ariella F., Benedicte Prelot, Jean-Pierre Mericq, Catherine Faur, e Sophie Monge. 2025. "Organic complexing groups and processes for the selective recovery of lithium from lithium-ion battery leachates: A review". *Chemical Engineering Journal* 520 (setembro): 165942. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.165942>.

Ma, Jie, Chunxiao Zhai, e Fei Yu. 2023. "Review of flow electrode capacitive deionization technology: Research progress and future challenges". *Desalination* 564 (outubro): 116701. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116701>.

Macedo, Thais Helena, Tatiane Benvenuti, Marco Antônio Siqueira Rodrigues, e Jane Zoppas Ferreira. s.d. *AVALIAÇÃO DO TRANSPORTE DE NÍQUEL ATRAVÉS DE MEMBRANAS CATIÔNICAS NO TRATAMENTO DE EFLUENTES POR ELETRODIÁLISE*.

Martí-Calatayud, M. C., D. C. Buzzi, M. García-Gabaldón, et al. 2014. "Sulfuric acid recovery from acid mine drainage by means of electrodialysis". *Desalination*, Special Issue: Desalination Using Membrane Technology, v. 343 (junho): 120–27. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.11.031>.

Meshram, Pratima, B. D. Pandey, e T. R. Mankhand. 2014. "Extraction of lithium from primary and secondary sources by pre-treatment, leaching and separation: A comprehensive review". *Hydrometallurgy* 150 (dezembro): 192–208. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.10.012>.

Nguyen, Thi Hong, e Man Seung Lee. 2018. "A Review on the Separation of Lithium Ion from Leach Liquors of Primary and Secondary Resources by Solvent Extraction with Commercial Extractants". *Processes* 6 (5): 55. <https://doi.org/10.3390/pr6050055>.

P. M. Tembo, V. Subramanian, e C. Dyer. 2024. "Lithium-ion battery recycling—a review of the material supply and policy infrastructure | NPG Asia Materials". *NPG Asia Materials*, agosto 30. <https://www.nature.com/articles/s41427-024-00562-8>.

Park, Jeongbeen, Juwon Lee, In-Tae Shim, et al. 2025. "Electrochemical Direct Lithium Extraction: A Review of Electrodialysis and Capacitive Deionization Technologies". *Resources* 14 (2): 27. <https://doi.org/10.3390/resources14020027>.

Porada, S., R. Zhao, A. van der Wal, V. Presser, e P. M. Biesheuvel. 2013. "Review on the science and technology of water desalination by capacitive deionization". *Progress in Materials Science* 58 (8): 1388–442. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.03.005>.

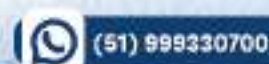
Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



Qureshi, Khizar, Rizwan Haider, Chenrui Zhang, Linsen Li, Xuebin Yu, e Xianxia Yuan. 2026. "Sustainable recycling of Lithium-ion batteries: A perspective on emerging technologies toward entire cell regeneration". *Applied Energy* 412 (junho): 127742. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2026.127742>.

Rezaei, Mina, Atiyeh Nekahi, Anil Kumar M R, et al. 2025. "A Review of Lithium-Ion Battery Recycling for Enabling a Circular Economy". *Journal of Power Sources* 630 (fevereiro): 236157. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.236157>.

Santos, Leonardo dos, Lindiane Bieseki, Luiz Bertolino, et al. 2020. *VALORIZAÇÃO DA CADEIA PRODUTIVA DO LÍTIO*.

Shin, Shun Myung, Nak Hyoung Kim, Jeong Soo Sohn, Dong Hyo Yang, e Young Han Kim. 2005. "Development of a metal recovery process from Li-ion battery wastes". *Hydrometallurgy* 79 (3): 172–81. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2005.06.004>.

Shuai, Jinping, Weizao Liu, Sohrab Rohani, et al. 2025. "Efficient extraction and separation of valuable elements from spent lithium-ion batteries by leaching and solvent extraction: A review". *Chemical Engineering Journal* 503 (janeiro): 158114. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.158114>.

Valmir dias dos Santos e Jairo José Pedrotti. 2021. "Células eletroquímicas para aplicação em sistemas de desionização capacitiva". TCC, Instituto Presbiteriano Mackenzie. <https://dspace.mackenzie.br/handle/10899/29049>.

Winslow, Kevin M., Steven J. Laux, e Timothy G. Townsend. 2018. "A review on the growing concern and potential management strategies of waste lithium-ion batteries". *Resources, Conservation and Recycling* 129 (fevereiro): 263–77. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.11.001>.

Xianlai Zeng, Jinhui Li, e Narendra Singh. 2014. "Recycling of Spent Lithium-Ion Battery: A Critical Review". *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 44 (10): 1129–65. <https://doi.org/10.1080/10643389.2013.763578>.

Xu, Xin, Yongmei Chen, Pingyu Wan, et al. 2016. "Extraction of lithium with functionalized lithium ion-sieves". *Progress in Materials Science* 84 (dezembro): 276–313. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.09.004>.

Yücel, Ayşegül, e Abdulkemim Yörükoğlu. 2024. "Use of Lithium Manganese Oxide Ion Sieves in Fixed Bed Columns for Lithium Recovery: A Mini-Review". *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 45 (8): 847–57. <https://doi.org/10.1080/08827508.2023.2295849>.

Zhai, Ruijiao, Kui Huang, Shanjin Mao, Rugui Li, Haili Dong, e Xi Zhai. 2026. "Recovery of Valuable Metals from Spent Lithium-Ion Batteries by Combining Reduction Roasting and Selective Leaching". *Recycling* 11 (3): 59. <https://doi.org/10.3390/recycling11030059>.

Realização



Correalizadores



Apoio Institucional

