



ANÁLISE DA REMOÇÃO DE AS, CU E NI DE EFLUENTE SINTÉTICO PELA TÉCNICA DE ELETRODIÁLISE

Mayara Teixeira da Silva¹

Jessica Gatti Silva²

Giovanna Zanetti Donegá³

Laís Ribeiro Pampanini⁴

Matheus Viriato Evangelista⁵

Miriam Maria de Resende⁶

Reaproveitamento, Reutilização e Tratamentos de Resíduos

Resumo

A presença de metais pesados em recursos hídricos possui alto potencial de acarretar graves danos à saúde humana devido às suas toxicidades. Deste modo, diversos estudos são realizados com o intuito de diminuir e tratar despejos industriais. O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência da remoção de arsênio, cobre e níquel de efluentes sintéticos utilizando a técnica de eletrodiálise. Foi avaliada a eficiência do tratamento, a fim de determinar a condição ótima de operação do sistema, visando resultar em concentrações finais que se enquadrem nas legislações sanitárias vigentes. A corrente de operação foi determinada a partir de valores referentes à 80% da corrente limite, onde notou-se que concentrações mais elevadas de metais nos efluentes resultaram em correntes elevadas. O sistema de eletrodiálise foi operado por 5 horas contínuas com vazões constantes de 40 L/h para cada uma das três soluções utilizadas (eletrolítica, concentrada e diluída). Ao fim dos experimentos, foi observado que os valores de pH e concentração apresentaram comportamentos inversos, enquanto a condutividade e a concentração demonstraram possuir tendências semelhantes. Os tempos ideais de tratamento foram: 75 minutos para o As isolado, tendo uma remoção de 93%; 75 minutos para o As na mistura, cuja remoção foi de 95%; 45 minutos para o Cu na mistura, com uma remoção de 72%; 120 minutos para o Ni na mistura, tendo uma remoção de 100%. Foi observado que os tempos e remoções dos efluentes com os metais isolados e o que continha a combinação dos três resultaram em um comportamento semelhante, possivelmente indicando que a combinação de metais não influenciou no processo de recuperação dos íons.

Palavras-chave: Eletrodiálise; Níquel; Arsênio; Cobre; Membranas de troca iônica.

¹Doutoranda em Engenharia Química – PPGEQ, Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, mayara.silva@ufu.br

²Doutoranda em Engenharia Química – PPGEQ, Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, jessicagatti16@gmail.com

³Graduanda em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, giovannazanetti@ufu.br

⁴Graduanda em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, laisrpampanini@ufu.br

⁵Graduando em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, matheus.evangelista@ufu.br

⁶Prof^ª. Dr^ª. Universidade Federal de Uberlândia – Campus Santa Mônica - MG, Faculdade de Engenharia Química- FEQUI, mresende@ufu.br



INTRODUÇÃO

A escassez de água é um problema global, o chamado estresse hídrico engloba não somente a falta de água, mas também o conflito entre seus usuários e a disputa entre os setores beneficiados (FAO, 2022). Estima-se que a agricultura seja a maior responsável pelo consumo de água mundial, sendo seguida pelo setor industrial (Biancalani, Marinelli, 2021). Deste modo, esses serviços podem influenciar significativamente o estresse hídrico dos países que os forneçam, principalmente, se estes possuírem poucas fontes aquíferas para exercê-los (FAO, UN Water, 2021).

Nota-se que o crescimento da indústria contribui para o aumento da poluição do recurso, assim como para a expansão da área de contaminação (Issakhov, Alimbek, Abylkassymova, 2023). No caso de contaminações por metais pesados, estes acabam contaminando rios e córregos através de resíduos não regulamentados (Gunther, 1999). A presença excessiva dessas substâncias nos recursos hídricos pode resultar em danos graves à saúde humana devido às suas toxicidades e ao seu potencial desenvolvimento de doenças crônicas em humanos (Siddiquee *et al.*, 2015).

Diante desses problemas, a ONU estabeleceu em 2015 o 6º Objetivo de Desenvolvimento Sustentável: assegurar a disponibilidade e a gestão sustentável da água e o saneamento para todos. Segundo o item 6.3, até 2030, deve-se melhorar a qualidade da água reduzindo a poluição através da minimização/eliminação da liberação de produtos químicos e materiais perigosos nos recursos hídricos. Deste modo, diversos estudos são realizados com o intuito de diminuir e tratar os despejos de efluentes em fontes hídricas.

A eletrodialise é uma técnica moderna de separação que é amplamente utilizada para purificação de soluções biológicas, desmineralização de misturas de alimentação e tratamento de águas residuais (Moura et al., 2014). As vantagens em relação à precipitação seletiva convencional e a extração por solvente são a produção mínima de resíduos, baixo consumo de energia e menor uso de produtos químicos (Chan et al., 2022).

Na eletrodialise, um conjunto de membranas seletivas faz com que os íons com cargas diferentes presentes no efluente sejam transportados para outra solução. Todo o processo ocorre na presença de um potencial elétrico aplicado entre os eletrodos ânodo e cátodo do aparelho. Tal técnica é realizada por meio de uma célula de eletrodialise, a qual

Realização



consiste em uma série de membranas de troca aniônica e catiônica alternadamente dispostas entre os eletrodos sob a influência de um potencial elétrico.

Neste estudo, será analisada a eficiência da remoção de arsênio (As), assim como da mistura de arsênio (As), cobre (Cu) e níquel (Ni) de efluentes sintéticos utilizando a técnica de eletrodiálise. Serão avaliadas variáveis que possivelmente afetem o desempenho do tratamento, a fim de determinar a condição ótima de operação do sistema, visando resultar em concentrações finais de metais que se enquadrem nas legislações sanitárias vigentes.

METODOLOGIA

A célula de eletrodiálise utilizada foi a PCCell ED 64 0 02, cujo interior era composto por um conjunto de 10 membranas aniônicas do tipo PC-SA, 9 membranas catiônicas do tipo PC-SK, 2 membranas catiônicas do tipo PC-SC, 10 espaçadores concentrados, 10 espaçadores diluídos e 2 espaçadores brancos.

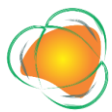
A metodologia empregada teve como base o estudo de Santos (2016). O procedimento de tratamento dos efluentes foi realizado de maneira análoga. Inicialmente três soluções de operação do sistema de eletrodiálise foram preparadas, utilizando água deionizada, conforme indicado na Tabela 1. Foram testados dois efluentes distintos, o primeiro contaminado apenas com As e o segundo com As, Cu e Ni, cuja a solução diluída utilizada continha os três compostos mostrados na Tabela 1, no caso do primeiro efluente continha apenas a composição de As.

Tabela 1. Composição das soluções de operação da eletrodiálise.

Solução	Composição	Volume
Concentrada	Água deionizada	
Eletrolítica	0,26 M de Na ₂ SO ₄	
Diluída	0,0017 M de NiCl ₆ H ₂ O	2L
	0,0016 M de CuSO ₄ .5H ₂ O	
	0,0001 M de solução de As padrão*	

*: solução padrão utilizada para leitura de Arsênio em Espectrofotômetro de Absorção Atômica em

Realização



Chama.

No presente estudo, os dois ensaios foram realizados em sequência e após o emprego de outros dois efluentes na mesma célula de eletrodialise. Os quais foram estudados por Evangelista *et al.* (2023a, 2023b), que trabalharam com efluentes contaminados inicialmente com Ni e em seguida com Cu, ambos isolados. Portanto, a célula de eletrodialise e as membranas utilizadas nos quatro ensaios, foram utilizadas na seguinte forma sequencial: Ni; Cu; As; e As, Cu, Ni.

A corrente limite de cada experimento foi determinada através da análise do comportamento da corrente elétrica do sistema enquanto ocorria uma variação sequencial de 0,2 V no potencial elétrico. Com esses valores foi construído o gráfico da resistência, no qual o ponto mínimo indica o valor da corrente limite. Por fim, a corrente de operação foi determinada a partir de valores referentes à 80% da corrente limite do sistema.

O sistema de eletrodialise foi operado por 5 horas com vazões constantes de 40 L/h para cada uma das três soluções. Foram coletadas amostras a cada 15 minutos para análise de pH, condutividade e concentração de metal. A concentração dos metais foi medida em espectrofotômetro de absorção atômica de chama AA-7000-Shimadzu, sendo o arsênio determinado através da incorporação de um forno de grafite no presente equipamento. A remoção dos metais foi calculada pela diferença da concentração final e inicial em relação à concentração inicial do metal, segundo a Equação 1.

$$R (\%) = \left(\frac{C_i - C_f}{C_i} \right) \cdot 100\% \quad (Eq.1)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nos ensaios para determinação da corrente limite para cada efluente estão dispostos na Tabela 2 e Figura 1, onde também são exibidos dados dos trabalhos Evangelista *et al.* (2023a, 2023b). Os valores de corrente e voltagem de operação obtidos foram empregados nos posteriores experimentos de eletrodialise.

Notou-se que concentrações mais elevadas de metais nos efluentes resultaram em correntes limites maiores. Esse fenômeno também foi observado no estudo de Feijoo *et al.* (2017), o qual associou o ocorrido com a maior quantidade de íons disponível para conduzir

Realização



a corrente elétrica, elevando os valores registrados. Como a resistência do meio tem forte ligação com a passagem de corrente por ele, foi verificado que os menores valores de mínimo da Figura 1 também ocorreram nos efluentes que possuíam maior concentração metálica, corroborando com a observação de Feijoo *et al.* (2017).

Tabela 2. Composição das soluções de operação da eletrodialise

Efluente	Corrente limite (A)	Voltagem limite (V)	Corrente de operação (A)	Voltagem de operação (V)
Ni*	0,100	23,400	0,080	18,720
Cu*	0,140	51,800	0,112	41,440
As	0,035	55,200 saw </td <td>0,028</td> <td>44,160</td>	0,028	44,160
As, Ni, Cu	0,190	25,000	0,152	20,000

*: Dados referentes aos trabalhos de Evangelista *et al.* (2023a; 2023b).

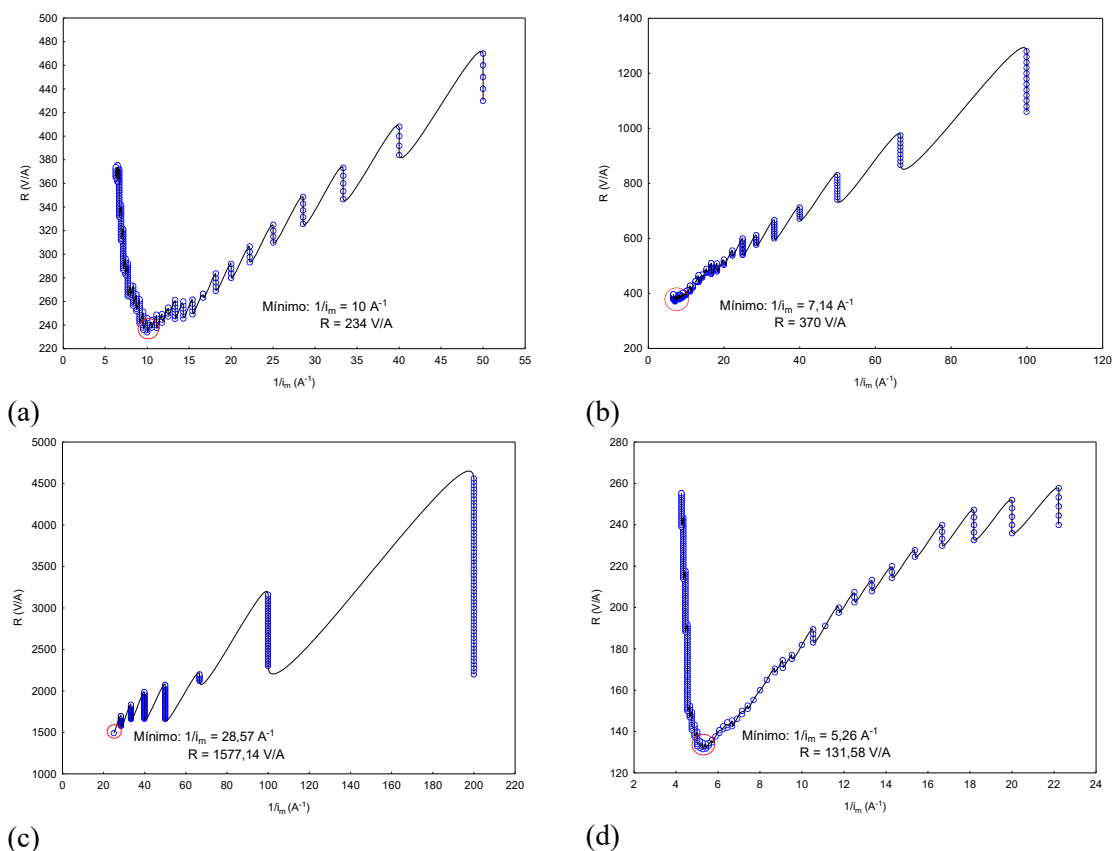
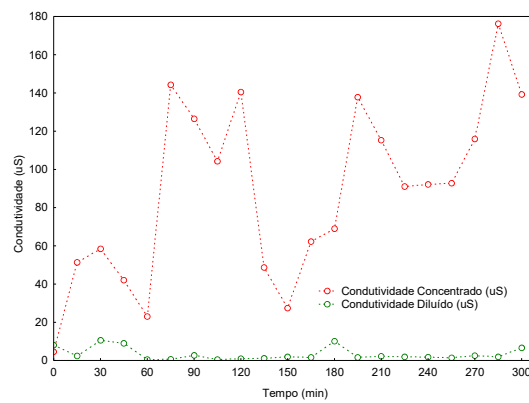
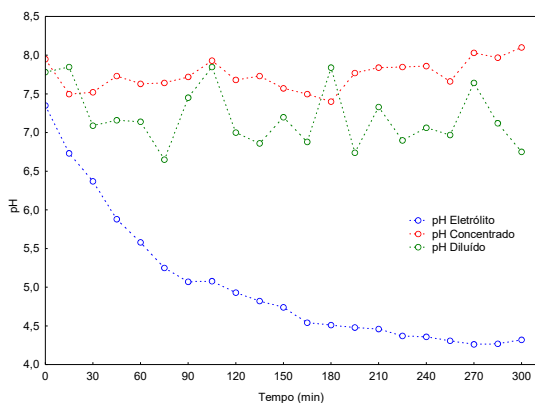


Figura 1. Corrente limite. a) Ni – Evangelista *et al.* (2023b); b) Cu – Evangelista *et al.* (2023a); c) As; d) As, Cu, Ni.

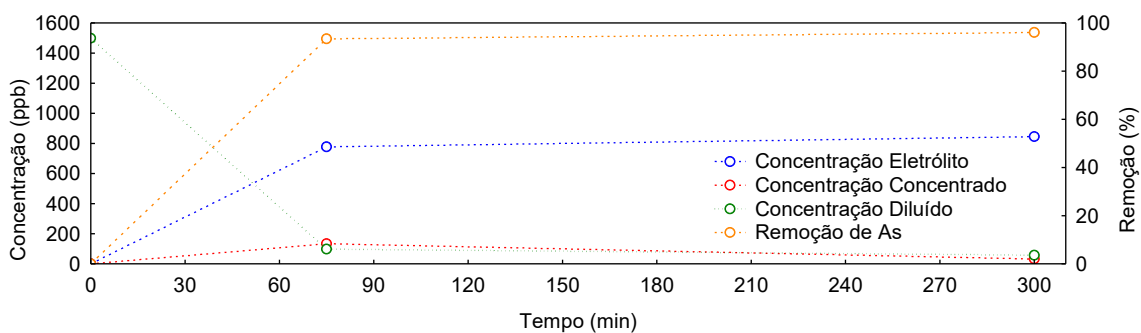
Realização

As Figuras 2 e 3 apresentam os resultados obtidos nas eletrodialises para os efluentes contaminados com arsênio isolado e com arsênio, níquel e cobre.



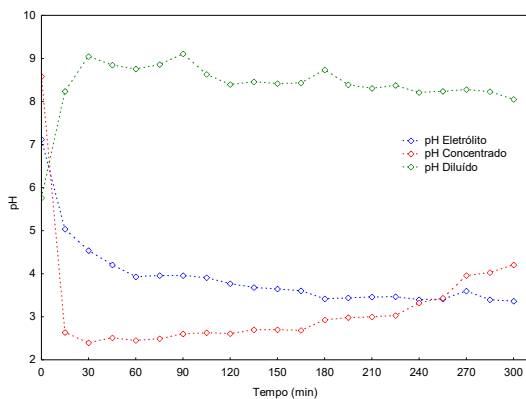
(a)

(b)

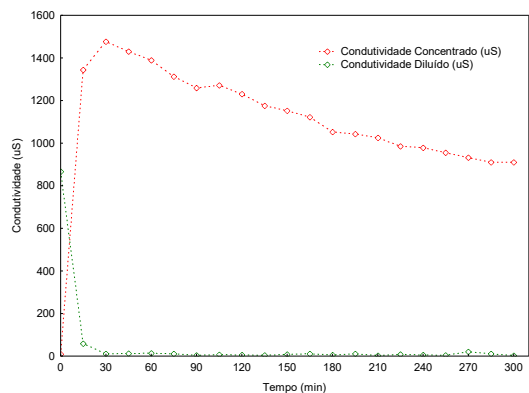


(c)

Figura 2. Comportamento da operação de eletrodialise com As. a) pH. b) Condutividade. c) Remoção no efluente.

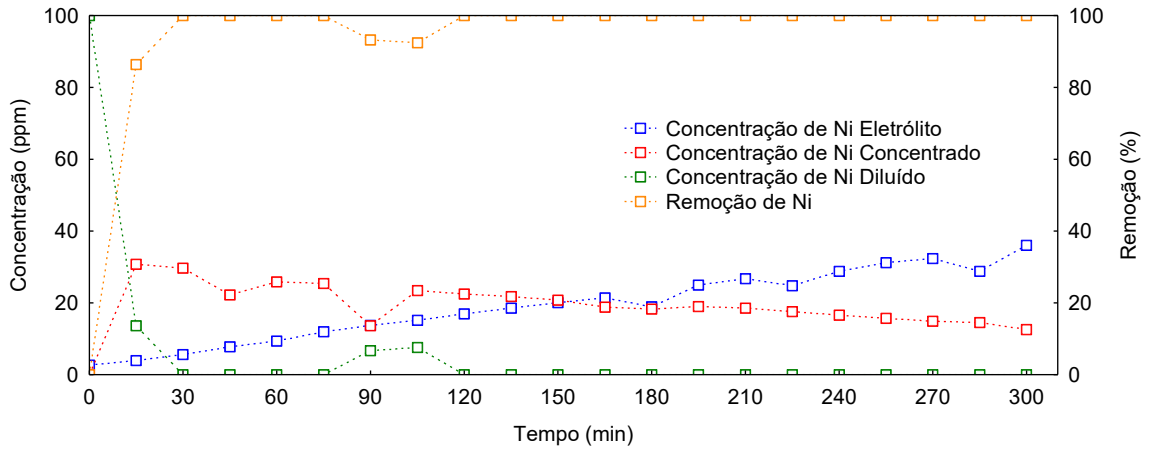
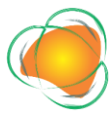


(a)

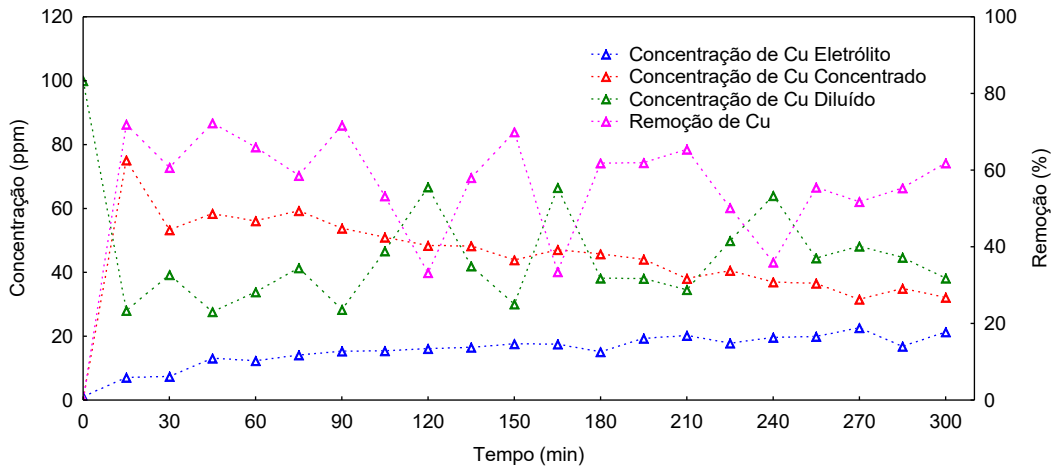


(b)

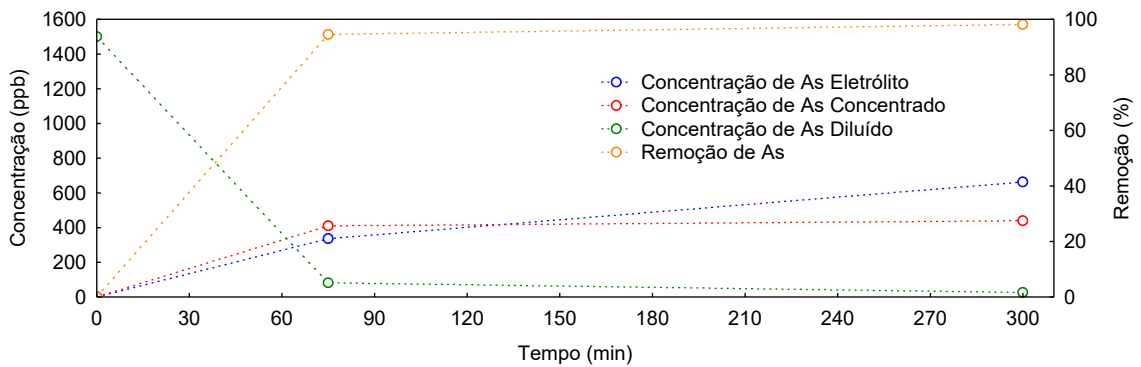
Realização



(c)



(d)



(e)

Figura 5. Comportamento da operação de eletrodialise com os 3 metais. a) pH. b) Condutividade. c) Remoção de Ni. d) Remoção de Cu. e) Remoção de As.

Realização



Observa-se que, quando comparadas com os valores de pH, as concentrações dos metais apresentam comportamento inverso, enquanto a comparação com as condutividades possui tendências semelhantes. Isso ocorre devido a presença dos íons influenciar a carga, e conseqüentemente, a condutividade do meio (Feijoo *et al.*, 2017). Tais comportamentos também ocorreram nos experimentos de Evangelista *et al.* (2023a, 2023b) com os efluentes contaminados com níquel e cobre isolados.

A Tabela 3 expõe os tempos ideais de remoção para cada efluente, assim como as recuperações alcançadas em cada tratamento, tanto no presente estudo quanto nos trabalhos de Evangelista *et al.* (2023b, 2023b).

Tabela 3. Períodos ideais para o tratamento de eletrodíalise

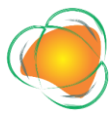
Efluente	Tempo (min)	Remoção (%)	Concentração (ppm)	Concentração Conama (ppm)
As	75	93	0,01	0,5
Cu*	45	100	0	1
Ni*	120	90	10	2
As, Cu, Ni	75/45/120	95/72/100	0,08/28/0	0,5/1/2

*: Dados referentes aos trabalhos de Evangelista *et al.* (2023a; 2023b).

Observa-se que os tempos e remoções dos efluentes com os metais isolados e o que continha a combinação dos três obtiveram comportamentos semelhantes, com exceção do cobre. Isso pode indicar que a combinação de metais não influenciou significativamente no processo de recuperação dos íons. Por outro lado, observa-se que a remoção do Cu foi menos efetiva quando realizada em conjunto, caindo de 100% para 72%, o que pode ter sido tanto um efeito de mistura quanto um efeito causado pelo *fouling* dos experimentos, uma vez que entre os processos não foi efetuada a limpeza da célula. O *fouling* é um processo de obstrução dos poros das membranas, o que faz com que a solução concentrada passe a trocar íons com a solução eletrolítica, pois esta possui uma membrana que apresenta uma menor resistência na transferência de massa (Amorim, 2018).

CONCLUSÕES

Realização



No estudo pode ser observado que a concentração de metais presentes no efluente influencia na densidade da corrente limite, e conseqüentemente, na corrente de operação da eletrodiálise. A concentração dos metais também apresentou ligações diretas com a condutividade e inversas com o pH das correntes de operação.

Outro ponto observado no trabalho foi a mistura dos metais não ter alterado as recuperações de cada íon separadamente, com exceção apenas do Cu, que teve uma remoção inferior quando analisada em comparação à seu efluente isolado.

Foi possível enquadrar o efluente de As dentro das normas do Conama estabelecidas para descarte, no entanto, o efluente da mistura dos metais não se adequou à regulamentação por causa do Cu, sendo considerado inapropriado para descarte.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Científico (CNPq) (processo n°: 404589/2021-9), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

REFERÊNCIAS

AMORIM, V. A. **Síntese e caracterização de membranas de troca iônica a partir de poli(álcool vinílico) e politiofeno para aplicação em eletrodiálise**. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2018.

BIANCALANI, R.; MARINELLI, M. Assessing SDG indicator 6.4.2 'level of water stress' at major basins level. **UCL Open Environment**, v. 3, n. 5, p. 1-17, 2021. DOI: 10.14324/111.444/ucloe.000026.

CHAN, K. H.; MALIK, M.; AZIMI, G. Separação de Li, Ni, Mn e Co de resíduos de baterias de íons de Li usando eletrodiálise. **Reciclagem, Conservação e Recuperação**, v. 178, p. 106076, 2022.

EVANGELISTA, M. T.; DONEGÁ, G. Z.; PAMPANINI, L. R.; SILVA, M. T.; RESENDE, M. M. Remoção de níquel de águas contaminadas pela aplicação da técnica de eletrodiálise durante. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 32, 2023 (a), Belo Horizonte.

EVANGELISTA, M. T.; DONEGÁ, G. Z.; PAMPANINI, L. R.; SILVA, M. T.; RESENDE, M. M. Remoção de cobre de águas contaminadas pela aplicação da técnica de eletrodiálise durante. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 32, 2023 (b), Belo Horizonte.

Realização





FACCO, D. S.; BENEDETTI, A. C.; KAISER, E. A.; PEREIRA FILHO, W. Avaliação da dinâmica do uso e cobertura da terra no município de Faxinal do Soturno no Estado do Rio Grande do Sul. In: **Congresso Nacional de Geografia Física**, 1, 2017, Campinas. Anais...Campinas, 2017.

FAO, UN Water. Food and Agriculture Organization, United Nations Water. **Progress on Level of Water Stress – Global status and acceleration needs for SDG Indicator 6.4.2**. Rome, 2021. 95 p. Report. <https://doi.org/10.4060/cb6241en>.

FAO. Food and Agriculture Organization. **The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at breaking point**. Rome, 2022. 393 p. Main report. <https://doi.org/10.4060/cb9910en>.

FEIJOO, G. C.; SCARAZZATO, T.; ESPINOSA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S. Influência da concentração e do pH na densidade de corrente limite de um sistema de membranas de troca iônica por eletrodialise para separação de cobalto (II). In: **Congresso Anual da ABM – Internacional**, 72, e **Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas**, 17, 2017, São Paulo. Anais... São Paulo, 2017.

GUNTHER, W. M. R. Área contaminada por disposição inadequada de resíduos industriais de galvanoplastia. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 20, Anais, 1999. ISSAKHOV, A.; ALIMBEK, A.; ABYLKASSYMOVA, A. Numerical modeling of water pollution by products of chemical reactions from the activities of industrial facilities at variable and constant temperatures of the environment. **Journal of Contaminant Hydrology**, v.252, p. 1-14, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2022.104116>.

MOURA, R. C. A.; OLIVEIRA JR., Z. T.; OLIVEIRA, A. C.; AMADO, F. D. R. Estudo da resistência ôhmica em membrana de troca catiônica no processo de eletrodialise. **Revista Iberoamericana de Polímeros**, v.15, n.1, p. 1-6, 2014.

SANTOS, C. S. L. **Aplicação do processo de eletrodialise na remoção de cromo em efluente sintético advindo de biorreator anaeróbico**. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Uberlândia. Minas Gerais, 2016.

SIDDIQUEE, S.; ROVINA, K.; AL AZAD, S.; NAHER, L.; SURYANI, S.; CHAIKAEW, P. Heavy Metal Contaminants Removal from Wastewater Using the Potential Filamentous Fungi Biomass: A Review. **Journal of Microbial & Biochemical Technology**, v.7, n.6, p. 384-393, 2015. DOI: 10.4172/1948-5948.1000243.

UN. United Nations. **Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development**. Report of the United Nations Conference on Celebration of Seventieth Anniversary, New York, 25–27 September 2015, resolution 70. Available in: <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N15/291/89/PDF/N1529189.pdf?OpenElement>. Accessed on: May 17, 2023.