

Recuperação hidrometalúrgica de chumbo de placas de circuito impresso residuais utilizando lixiviantes químicos e biolixiviação com cepas de *Acidithiobacillus ferrooxidans*

Jessica Gatti Silva¹

Jussara Maria Martins de Almeida Afonso²

Miriam Maria de Resende³

Vicelma Luiz Cardoso⁴

Reaproveitamento, Reutilização e Tratamento de Resíduos (sólidos e líquidos)

Resumo

Placas de circuito impresso (PCIs) de computadores obsoletos coletadas para este estudo foram desmontadas manualmente, trituradas em um triturador de martelo e passadas por peneiras de diferentes tamanhos de partículas. A fração de tamanho de partícula retida na peneira de 75 µm foi selecionada para este estudo. O preparo da amostra por cominuição e peneiramento mostrou-se eficiente, resultando em uma amostra em pó com viabilidade a ser estudada. O pó residual das placas de circuito impresso foi caracterizado por Microscopia Eletrônica de Varredura - Espectroscopia de raios X por dispersão de energia (MEV-EDS). Os metais Al, Cu, Pb, Zn, Ni, Cr, Cd, Fe e Au são apresentados para caracterização usando ambas as técnicas. A proporção obtida para chumbo e alumínio em MEV-EDS indicou 0,72% e 7,08% respectivamente. As lixiviações foram realizadas em água régia com diferentes tempos e densidades sólidas. Avaliando a concentração de cromo com o aumento do tempo de digestão, verificou-se um aumento na recuperação de cromo. A maior densidade sólida leva a uma menor concentração de chumbo. Posteriormente, avaliou-se a remoção de chumbo e alumínio presentes em PCIs de computadores obsoletos através da biolixiviação com *Acidithiobacillus ferrooxidans*, que se mostrou eficiente com valores de recuperação de 81,74% para o alumínio e 57,48% para o chumbo.

Palavras-chave: Lixo eletrônico; Determinação de chumbo; Digestão de amostras; Espectrometria de raios-x de dispersão de energia.

¹Aluna de doutorado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia – jessicagatti16@gmail.com.

²Aluna de doutorado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, jussarammartins@live.com.

³Prof. Dra. Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Química, mresende@ufu.br.

⁴Prof. Dra. Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Química, vicelma@ufu.br.

INTRODUÇÃO

O lixo de equipamentos eletrônicos, também conhecido como lixo eletrônico ou sucata eletrônica, inclui todos os tipos de equipamentos eletrônicos danificados, obsoletos ou que chegaram ao fim de sua vida útil, incluindo computadores, telefones celulares, eletrodomésticos, televisores e peças deste equipamento, como placas de circuito impresso (PCIs). O consumo desenfreado de equipamentos eletrônicos, aliado à rápida imersão de novas tecnologias no mercado, impulsiona o crescimento acelerado do lixo eletrônico (Marques et al., 2013).

A quantidade de lixo eletrônico cresce três vezes mais rápido que o lixo municipal (Qiu et al., 2020). A produção global de lixo eletrônico atingiu cerca de 44,7 milhões de toneladas em 2016; em 2021, projeta-se um aumento de 17%, totalizando 52,2 milhões de toneladas (Forti et al., 2020). O lixo eletrônico tem uma composição complexa que inclui metais, cerâmicas, plásticos e outros resíduos indesejados (Yaashikaa et al., 2022).

As placas de circuito impresso (PCIs) chamaram a atenção do público por seus materiais prejudiciais ao meio ambiente e muitos metais não ferrosos valiosos (Yao et al. 2018). Em geral, os resíduos de PCI contêm aproximadamente 30,00% de metais e 70,00% de não metais. Especialmente, os metais típicos em resíduos de PCI consistem em cobre (20,0%), ferro (8,0%), estanho (4,0%), níquel (2,0%), chumbo (2,0%), zinco (1,00%), prata (0,20%), ouro (0,10%) e paládio (0,005%) (Huang et al., 2009).

A composição exata de metal nas PCIs varia consideravelmente dependendo da função original (Khaliq et al., 2014). Metais básicos, como Cu, Zn, Al e Ni presentes em PCIs são de menor valor em comparação com metais preciosos, mas normalmente são de maior teor (Islam e Huda, 2019). Isso torna as PCIs um valioso recurso secundário se reciclados adequadamente, permitindo a recuperação de metais. O chumbo destaca-se entre os metais pesados devido ao seu amplo uso e persistência no solo, sendo considerado um dos mais importantes poluentes.

Quando incorporado ao solo, este elemento pode afetar a cadeia alimentar,

Realização



Apoio



constituindo uma ameaça essencial devido à sua alta toxicidade para o homem (Torri, 2009), além de possuir uma ampla gama de aplicações e ainda ser um dos metais mais utilizados globalmente (da Silva, 2013). Os padrões para lançamento de efluentes no corpo receptor vigentes na legislação brasileira estão listados na Resolução CONAMA nº 430 de 13 de maio de 2011. Para chumbo, o valor máximo é de 0,50 mg/L; entre 33 listados, é o quinto mais restrito, sendo a concentração permitida uma das mais baixas.

O destino dos equipamentos eletrônicos é a incineração; no entanto, quando descartados em aterros, metais como chumbo, cádmio e mercúrio podem ser lixiviados, contaminando o solo. A queima de equipamentos eletrônicos libera gases tóxicos (dioxinas e furanos) devido à presença de compostos bromados, clorinatos, fosfatos e ésteres (Guo et al. 2010). Nessa perspectiva, a reciclagem de resíduos de equipamentos eletrônicos contribui para aumentar a vida útil dos aterros sanitários e conservar os recursos naturais.

Na reciclagem de metais das PCIs, as técnicas mais comuns são a separação mecânica, pirometalurgia, hidrometalurgia e biohidrometalurgia (Birloaga et al., 2013). Nesse caso, a biohidrometalurgia pode ser um método alternativo na extração de metais básicos (Choi et al., 2004) e na extração de metais preciosos de sucata eletrônica (Brandl & Faramarzi, 2006; Yken et al., 2020). Como um novo método, a biolixiviação (biohidrometalurgia) é um método alternativo para extração de metais (Choi et al., 2004) e extração de metais preciosos de sucata eletrônica (Brandl e Faramarzi, 2006). A biohidrometalurgia consiste em microrganismos ou seus metabólitos na oxidação, redução, dissolução e absorção de certos minerais e elementos durante o processo de dissolução do metal (Wang et al., 2018).

A técnica biometalúrgica explora uma ampla gama de bactérias acidófilas oxidantes de ferro e enxofre, especialmente da classe das gamaproteobactérias, como *Acidithiobacillus ferrooxidans*, para biolixiviação de metais (Arshadi e Yaghmaei, 2020; Brandl et al., 2001; Ilyas et al., 2007; Yang et al., 2007; Yang et al., al., 2017). Estudos relacionados à biodissolução de metais de PCIs residuais explorando culturas puras e

Realização

Apoio

mistas de gamaproteobactérias foram relatados na literatura (Benzal et al., 2020; Heydarian et al., 2018; Yang et al., 2017). Embora a espécie tenha sido investigada por seu potencial de biolixiviação, ela não foi extensivamente explorada para recuperação de metais das PCIs (Priya e Hait, 2020).

Assim, o presente estudo trata da recuperação do resíduo das placas de circuito impresso a partir da lixiviação com água régia com densidades de polpa, 2,5 g/L, 12,5 g/L e 25 g/L. Os valores são comparados com a caracterização realizada por espectrometria de raios X de dispersão de energia (MEV-EDS).

METODOLOGIA

Resíduos de placas de circuito impresso (PCIs)

As placas de circuito impresso (PCIs) dos computadores utilizados neste estudo foram recolhidas em empresas de assistência técnica e de coleta e descarte especializadas em eletroeletrônicos da cidade de Uberlândia, MG. Eles foram desmontados manualmente com a ajuda de alicates e equipamentos de segurança individual. As peças plásticas e as baterias foram retiradas e os demais componentes (placas, resistores e capacitores) foram triturados em um triturador de martelo.

O material obtido do moinho de martelos foi homogeneizado e passado por peneiras. A amostra utilizada é a fração granulométrica retida na peneira de 75 μm e passada pela peneira de 100 μm . As PCIs trituradas foram subsequentemente homogeneizadas e segregadas em duas partes. Uma parte foi utilizada para a avaliação do teor de metais e a outra foi utilizada para estudos de biolixiviação para extração de chumbo.

Para determinar o teor de metal das PCIs, foram realizadas medidas por Espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDS) a partir de micrografias tiradas por Microscópio eletrônico de varredura. As proporções de metal pelo EDS foram medidas em micrografias em 3 ampliações diferentes (50, 200 e 1000 vezes).

Realização



Apoio





Hidrometalurgia

As digestões foram realizadas com água régia, composta por ácido nítrico (65% p/p) e ácido clorídrico (36,00% p/p) para três densidades de sólidos das PCIs. Foi usado um bloco digestor da marca Marconi, modelo MA 056, ajustado a 190oC sem agitação mecânica, acoplado a um purificador de gás.

As densidades de polpa de PCI utilizadas foram de 2,5 g/L, 12,5 g/L e 25 g/L em diferentes tempos. Os digeridos obtidos foram resfriados e filtrados a vácuo usando papel de filtro de 0,22 µm. Em seguida, foram mantidos a 4oC até a leitura no Espectrômetro de Absorção Atômica de Chamas (EEAC) Série AA-7000 da marca Shimadzu para medir as concentrações de metais presentes em cada amostra.

Bactérias para biolixiviação

As cepas de *Acidithiobacillus ferrooxidans* LR foram gentilmente doadas pelo Instituto de Química da Universidade Estadual Paulista (Garcia Jr., 1991) pela professora Denise Bevilaqua. Estas amostras bacterianas foram isoladas de uma mina de urânio no estado do Paraná, Brasil e fazem parte do banco de linhagens do laboratório de biohidrometalurgia - UNESP/Araraquara-São Paulo.

A cultura da bactéria acidófila *Acidithiobacillus ferrooxidans* foi cultivada duas vezes por mês em meio T&K (Tuovien Kelly, 1973). Em testes de biolixiviação subsequentes, o meio T&K também foi usado como efluente sintético.

Ensaio de biolixiviação

O ensaio de biolixiviação por *Acidithiobacillus ferrooxidans* foi realizado em Erlenmeyers de 250mL, preparados com 80mL de meio com pH ajustado para 1,80, fechado adequadamente com rolhas de algodão e gaze. O meio foi esterilizado em autoclave por 20 min a 1 atm e 12°C, 10mL de inóculo com concentração inicial de 10⁷ células/mL medida por câmara de Neubauer e 20mL de solução de sulfato de ferro (FeSO₄.7H₂O), totalizando assim 110ml.

A cepa de *A. ferrooxidans* foi incubada por 5 dias até que a cor do meio mudasse

Realização



Apoio



de branco esverdeado para vermelho tijolo (XIU et al., 2010). Em seguida, foram adicionados 0,240g da amostra da PCI (densidade do pó 2,18 g/L) de pó após a remoção do ferro usando ímãs de neodímio, contendo os metais a serem branqueados e deixados por 7 dias.

Todas as amostras coletadas para leitura das concentrações nos ensaios de biolixiviação foram previamente centrifugadas por 10 min em centrífuga (Hitachi, modelo CF15RXII) e filtradas em filtro a vácuo com filtro de membrana de 0,22 µm, marca Kasvi. As amostras filtradas foram digeridas de acordo com a NBR 9898 (Técnicas de preservação e amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores). Posteriormente, as concentrações dos metais foram obtidas a partir de leituras no EEAC, modelo Shimadzu Série AA-7000.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A composição metálica qualitativa dos metais das PCIs após a cominuição e na faixa selecionada observada sob o MEV-EDS pode ser visto na Tabela 1. Os resultados da EDS das PCIs trituradas revelaram a presença abundante de metais gerais na trituração de PCIs. A Tabela 01 exemplifica os metais relevantes para os testes realizados neste estudo. Inúmeros fatores precisam ser considerados ao projetar processos de lixiviação. O teor de metal varia dependendo do tipo de PCI usado, bem como do tamanho da fração.

Tabela 01: Proporções de metais lidas em EDS para a fração selecionada de amostras trituradas e peneiradas.

Composição de Metal %								
Al	Cu	Pb	Zn	Ni	Cr	Cd	Fe	Au
7.08 ±	1.86 ±	0.72 ±	0.37 ±	0.14 ±	0.12 ±	0.05 ±	5.30 ±	12.99
1.35	0.51	0.12	0.24	0.02	0.02	0.02	0.82	± 1.05

Realização

Apoio

O teor global de Al foi o maior (7,08%), seguido de ferro 5,30%. Os teores de Cu, Pb e Zn foram notavelmente menores: 1,86, 0,72 e 0,37, respectivamente. O teor de metal dos PCIs usados neste estudo é típico de placas de circuito de baixa qualidade. Os valores de ouro para PCIs triturados indicaram 12,99%. Este valor de ouro não pôde ser exato uma vez que as amostras foram metalizadas com ouro para leitura no equipamento. Então, este metal necessita de outra caracterização para sua avaliação.

Yken et ai. (2020), trabalhando com placas de circuito de alta qualidade, encontraram teores de Cu, Al, Zn e Ni de 58,78%: 3,33%, 0,569% e 0,423%, respectivamente. Os teores de Au e Ag nos PCIs foram de 80,3 ppm e 228 ppm, respectivamente. A comparação das caracterizações do EDS mostra que uma diferença significativa nos teores encontrados para os metais provavelmente deve-se ao tipo de placas utilizadas ou ao processo de separação dos componentes utilizados.

Hidrometalurgia

A Tabela 02 apresenta os resultados obtidos para as digestões avaliando diferentes quantidades de pó e tempos de digestão no lixiviado de água régia.

Tabela 02: Digestões realizadas com 40 mL de água régia em diferentes tempos e densidades de sólidos. Remoções calculadas em relação ao MEV-EDS.

Ensaio	Densidade Sólida (g/L)	Tempo (h)	Concentração de chumbo mg/L	Massa de chumbo (mg)	Remoção de chumbo (%)
1	25	1	10.0	0.4	5.56
2	2.5	4	3.25	0.13	18.06
3	25	4	22.5	0.9	12.50
4	2.5	8	6.25	0.25	34.72
5	12.5	8	23.75	0.95	26.39
6	25	8	45.0	1.8	25.0

Os resultados da digestão mostrados na Tabela 02 indicaram uma proporção mais significativa de chumbo no ensaio número 4, que durou 8h para um menor valor estudado

Realização

Apoio

de densidade da polpa. Ao comparar os testes 1, 3 e 6, alterando apenas o tempo, verifica-se que um aumento no tempo de digestão aumenta a concentração total de chumbo no meio de 125% para os testes 1 e 3 e 350% para os testes 1 e 6. O mesmo comportamento pode ser observado nos testes 2 e 4, que também indicaram um aumento de 92,31%, mostrando que o tempo de digestão interferiu nos resultados de lixiviação do chumbo.

Nos ensaios 2 e 3, em que foram avaliadas diferentes densidades de sólidos, verificou-se que uma maior densidade de sólido leva a uma menor concentração de chumbo lixiviado. O mesmo comportamento foi confirmado nos ensaios 4, 5 e 6.

Essas reações de processo hidrometalúrgico são mais fáceis de controlar e causam menos danos ambientais do que o processo pirometalúrgico (Ghosh et al., 2015). Geralmente é usado para recuperar cobre e ouro de minérios cujos teores são muito baixos, além de proporcionar menor consumo de energia (Yaashikaa et al., 2022).

Mankhand et al., (2012) utilizaram duas rodadas de lixiviação tendo como reagente de lixiviação o ácido nítrico. Na primeira rodada a 323 K por 72h, o Ni foi recuperado com uma quantidade de concentração de 279 mg/L. Seguindo pela próxima rodada, o metal Cu foi recuperado a 362 K por 6h com uma quantidade de concentração de 3220 mg/L. Assim, a recuperação de níquel, cobre e antimônio do lixo eletrônico pode ser mais bem facilitada pela técnica de hidrometalúrgica. No entanto, o tratamento tem uma desvantagem significativa na medida em que cria haletos ou cianetos, que são conhecidos por serem resíduos muito tóxicos que são extremamente prejudiciais ao solo e ao abastecimento de água.

Touze et al. (2020) avaliaram a quantificação dos efeitos nas incertezas do tamanho das partículas, na massa da amostra digerida e no número de repetições de digestão. Focou-se na abundância de seis metais em resíduos das PCIs: Cu, Fe, Zn, Pb, Ni e Co. A partir da análise estatística dos dados, a margem de erro foi prevista em função da massa da amostra, tamanho de partícula e número de repetições de digestão.

Priya e Hait (2020) caracterizaram PCIs de computadores e revelaram que eles contêm muitos metais gerais, como Cu, Zn, Pb, Ni, seguidos por metais preciosos, Ag e

Realização

Apoio

Au. Entre os metais quantificados, Cu com mais de 20% em peso foi o metal base abundante, enquanto Zn, Pb e Ni tiveram 1,59%, 4,64% e 0,014%, respectivamente. Ag e Sc foram determinados como o precioso predominante.

Solubilização de metais por cepas bacterianas

As amostras utilizadas nessa etapa passaram pela remoção do ferro presente na fração selecionada a fim de reduzir as possíveis interferências deste metal. Devido ao uso das bactérias acidófilas *A. ferrooxidans*, e estas trabalharem em pH baixos com valores de 1,0 a 3,0, a utilização de uma amostra muito rica em ferro poderia interferir nos resultados de biolixiviação (Tabela 03).

Tabela 03: Concentrações de Al e Pb obtidas após biolixiviação por *A. ferrooxidans* após 5 dias de incubação.

Concentração de metal (mg/L)		
	Al (mg/L)	Pb (mg/L)
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	229.00	2.38

Os resultados apresentados na Tabela 03 indicaram que a bactéria acidófila *A. ferrooxidans* auxiliou no processo de biolixiviação dos metais. No presente ensaio, as concentrações de referência de alumínio e chumbo foram 280,14 mg/L e 4,14 mg/L, resultando em valores liberados na biolixiviação de 81,74% e 57,48%, respectivamente, em comparação com os valores obtidos por Jesus e Casqueira (2015).

Ye et al. (2021) mostraram em seus resultados que a adição de microrganismos com rejeitos de minas acelerou efetivamente o processo de biolixiviação, atingindo eficiências máximas de extração de Zn e Fe de 95,45% e 83,98%, respectivamente, após 25 dias.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A primeira etapa do estudo, na qual foi realizada a separação, preparação e

Realização

Apoio

trituração das placas de circuito impresso dos descartes, mostrou-se satisfatória. Os procedimentos utilizados em um pó de PCIs possibilitam a aplicação desta amostra em diferentes tipos de testes e análises.

Os ensaios de lixiviação alteraram o tempo e a densidade de sólidos. Foi verificado que a diminuição da densidade do sólido resultou em valores maiores quando comparados à digestão com maior massa. O aumento do tempo de lixiviação aumentou a recuperação com um aumento de 350% entre os tempos de 1h e 8h.

A bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans* mostrou-se eficiente na biolixiviação de PCIs, com valores de biolixiviação de 81,74% para alumínio e 57,48% para chumbo. A recuperação dos metais contidos nas placas de circuito impresso deste estudo indicou possibilidades de novos estudos que possibilitem a utilização desse meio de recuperação para posterior aproveitamento dos metais recuperados em escala industrial e redução do impacto ambiental causado pela mineração.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Científico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

REFERÊNCIAS

- Arshadi, M., Yaghmaei, S., 2020. Avanços na biolixiviação de cobre e níquel de resíduos eletrônicos usando *Acidithiobacillus ferrooxidans*: avaliando o ajuste diário do pH. **Química Pap.** 74, 2211-2227.
- Benzal, E., Cano, A., Solé, M., Lao-Luque, C., Gamisans, X., Dorado, A.D., 2020. Recuperação de cobre de PCBs por *Acidithiobacillus ferrooxidans*: toxicidade de biolixiviados na atividade biológica. **Waste Biomass Valor.**
- Birloaga, I.; De Michelis, I.; Ferella, F.; Buzatu, M. & Vegliò, F. Estudo sobre a influência de vários fatores no processamento hidrometalúrgico de placas de circuito impresso de resíduos para recuperação de cobre e ouro. **Gestão de Resíduos** 33 (2013) 935–941.
- Brandl, H., Bosshard, R., Wegmann, M., 2001. Micróbios comedores de computador: lixiviação

Realização



Apoio





- de metal de sucata eletrônica por bactérias e fungos. *Hidrometalurgia* 59.319-326.
- Brandl, H., Faramarzi, M. A. 2006. Interação micróbio-metal para o tratamento biotecnológico de resíduos sólidos contendo metais. **China Particuology**, v. 4, n.2, p.93-97.
- Choi, M-S., Cho, K-S., Kim, D-S., Kim, D-J. 2004. Recuperação microbiana de cobre de placas de circuito impresso de resíduos de computador por *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *J. Ambiente. Sci. Saúde, Parte A, Meio Ambiente. Sci. Eng. Tóxico. Hazard*, v. A39, n.11, p. 1-10.
- Cui, J., Zhang, L., 2008. Recuperação metalúrgica de metais de lixo eletrônico: uma revisão. **J. Perigo. Mater.** 158, 228-256.
- da Silva, **Química analítica aplicada ao estudo do chumbo Psico**, Porto Alegre, PUCRS, v. 44, n. 4, pp. 571-580, out./dez. 2013.
- Forti V., Baldé C.P., Kuehr R., Bel G. The Global E-waste Monitor 2020: Quantidades, fluxos e o potencial da economia circular. Universidade das Nações Unidas (UNU)/Instituto das Nações Unidas para Treinamento e Pesquisa (UNITAR) – co-organizou o Programa SCYCLE, União Internacional de Telecomunicações (UIT) e Associação Internacional de Resíduos Sólidos (ISWA), Bonn/Genebra/Roterdã. ISBN Digital: 978-92-808-9114-0 ISBN Impresso: 978-92-808-9115-7.
- Ghosh, B., Ghosh, M.K., Parhi, P., Mukherjee, P.S., Mishra, B.K., 2015. Reciclagem de placas de circuito impresso de resíduos: uma extensa avaliação do status atual. **J. Limpo. Prod.** 94, 5-19.
- Guo, Q; Yue, X.; Asa, M; Liu, Y. 2010. Pirólise de partículas plásticas de sucata de placas de circuito impresso em leito fluidizado. **Tecnologia do Pó**, vol. 198, p.422-428.
- Heydarian, A., Mousavi, S.M., Vakilchah, F., Baniyasi, M., 2018. Aplicação de uma cultura mista de bactérias acidófilas adaptadas na biolixiviação de duas etapas de baterias de laptop de íons de lítio gastas. **J. Fontes de Energia** 378, 19–30
- Ilyas, S., Anwar, M. A., Niazi, S. B., Ghauri, M. A. 2007. Biolixiviação de metais de sucata eletrônica por bactérias acidófilas moderadamente termofílicas. **Hidrometalurgia**, v. 88, n.1-4, p.180-188, 2007.
- Islam, M.T., Huda, N., 2019. Lixo eletrônico na Austrália: estimativa de geração e recuperação de material inexplorado e potencial de receita. **J. Limpo. Prod.** 237, 117787.
- Jesus T A. Casqueira R G. 2015. Caracterização e beneficiamento primário de placas de circuito impresso (PCI) de telefones celulares **Revista Eletrônica Teccen**, Volume 8, Número 2, 53-64(12).
- Khaliq, A., Rhamdhani, M., Brooks, G., Masood, S., 2014. Processos de extração de metais para resíduos eletrônicos e rotas industriais existentes: uma revisão e uma perspectiva australiana. **Recursos** 3, 152–179.
- Mankhand, T.R., Singh, K.K., Gupta, S.K., Das, S., 2012. Pirólise de placa de circuito impresso. **Int. J. Metall. Eng.** 1, 102-107.
- Marques, C., Cabrera, J. M., Malfatti, C. de F. 2013. Placas de circuito impresso: uma revisão sobre a perspectiva da sustentabilidade. *Revista de Gestão Ambiental*, v. 131, p.298-30.
- Priya, A. Hait, S. 2020. Recuperação biometalúrgica de metais de placas de circuito impresso de resíduos usando cepas puras e mistas de *Acidithiobacillus ferrooxidans* e *Acidiphilium acidophilum*, **Process Safety and Environmental Protection**, Volume 143, 2020, 262-272, ISSN 0957-5820.
- Qiu, R., Lin, M., Ruan, J., Fu, Y., Hu, J., Deng, M., Tang, Y., Qiu, R., 2020. Recuperando recursos metálicos completos de resíduos de circuito impresso placas: uma revisão refinada. **J. Limpo. Prod.** 244, 118690.
- Torri, S.; Lavado, R. 2009. Absorção vegetal de oligoelementos em solos alterados por lodo e

Realização

Apoio



- correlação com a especiação química do solo. **Journal Hazardous Materials**, v. 166, n. 2/3, pág. 1459-1465.
- Touze, S.; Guignot, S.; Hubau, A. Devau, N.; Chapron, S., 2020. Amostragem de placas de circuito impresso de resíduos: Alcançando a combinação certa entre tamanho de partícula e massa de amostra para medir o conteúdo de metal, *Waste Management* 118 (2020) 380–390.
- Wang L, Li Q, Li Y, Sun X, Li J, Shen J, Han W, WANG L. 2018. Uma nova abordagem para recuperação de metais de placas de circuito impresso de resíduos e remoção simultânea de ferro de licor de decapagem de aço por dois método hidrometalúrgico de etapas. *Gestão de Resíduos*, v. 71, p. 411-419.
- Xiu, F.R., & Zhang, F.-S. 2010. Recuperação de materiais de placas de circuito impresso de resíduos por metanol supercrítico. **Journal of Hazardous Materials**, 178(1), 628-634.
- Yaashikaa PR, Priyanka B, Senthil Kumar P, Karishma S, Jeevanantham S, Indraganti S. 2022. Uma revisão sobre os avanços recentes na recuperação de metais valiosos e tóxicos do lixo eletrônico usando a abordagem de biolixiviação. **Quimiosfera**. Jan;287(Pt 2):132230. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.132230. **Epub** 2021 9 de setembro. PMID: 34826922.
- Yang, C., Zhu, N., Shen, W., Zhang, T., Wu, P., 2017. Biolixiviação de cobre de concentrados metálicos de placas de circuito impresso de resíduos por uma cepa Z1 recém-isolada de *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *J. Mater. Ciclos Gestão de Resíduos*. 19, 247-255.
- Yao, Z.; Ling, T.-C.; Sarker, P.; Su, W.; Liu, J.; Wu, W.; Tang, J. 2018. Reciclagem de vidro de tubo de raios catódicos de resíduos eletrônicos difíceis de tratar como materiais de construção e construção: uma revisão crítica. *Renovar. Energia Sustentável Renovável Rev.*, 81, 595–604.
- Ye, M., Liang, J., Liao, X, Li, L., Feng, X., Qian, W., Zhou, S., Sun, S., 2021, Biolixiviação para desintoxicação de rejeitos de flotação de resíduos: Relação entre substâncias EPS e comportamento de biolixiviação, **Journal of Environmental Management**, 279, 111795, ISSN 0301-4797.
- Yken, J.V, Cheng, K.Y., Boxall, N.J., Nikoloski, A.N., Moheimani, N., Valix, M., Sahajwalla, V., Kaksonen, A. H. 2020. Potencial de lixiviação de metais de placas de circuito impresso com lixiviantes biológicos e químicos, **Hidrometalurgia**, V.196, 105433.

Realização

Apoio