

SEPARAÇÃO SELETIVA DE COBRE PRESENTE EM LICORES DE LIXIVIAÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO POR MEIO DE EXTRAÇÃO POR SOLVENTES: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA*

Bruna Elisa Costa¹
Matheus Mello Pereira²
Versiane Albis Leão³

Resumo

A reciclagem de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) é um desafio mundial e se tornou uma questão ambiental crítica. As Placas de Circuito Impresso (PCI) constituem cerca de 5% da sucata eletrônica total gerada, sendo compostas por materiais tóxicos e metais nobres e base. A Extração por Solventes (ES) é uma das técnicas de separação mais utilizadas devido a sua simplicidade, rapidez e menor impacto ambiental. Neste sentido, o objetivo do presente trabalho foi apresentar uma revisão sistemática acerca do tema e descrever alguns casos que empregaram a técnica de ES para a separação seletiva de cobre presente em licores de lixiviação de PCI. A metodologia aplicada envolveu quatro passos principais: (i) identificação, (ii) busca, (iii) seleção e (iv) análise. A partir das buscas, foram identificados um volume de 17.297 artigos, sendo que apenas oito (8) artigos foram considerados relevantes para o tema abordado, levando em conta o resumo e a pergunta norteadora do presente trabalho. Em suma, notou-se que dentre os autores estudados, os resultados obtidos foram satisfatórios, apresentando valores de recuperação de cobre superiores a 90%.

Palavras-chave: Reciclagem; Placas de Circuito Impresso (PCI); Extração por solventes; Cobre.

SELECTIVE COPPER SEPARATION PRESENT IN LIQUORS OF LEACHING OF PRINTED CIRCUIT BOARDS BY SOLVENT EXTRACTION: A SYSTEMATIC REVIEW OF THE LITERATURE

Abstract

Recycling of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) is a worldwide challenge and has become a critical environmental issue. Printed Circuit Boards (PCB), which are composed of toxic materials as well as base and noble metals, constitute about 5% of the total electronic scrap generated. Solvent Extraction (SX) is one of the most widely used separation techniques due to its simplicity, fast kinetics and low environmental impact. In this sense, the objective of the current work was to present a critical review on the subject and to describe cases in which SX was applied in the selective separation of copper from liquors produced during PCB leaching. The applied set-up comprised four main steps: (i) identification, (ii) search, (iii) selection and (iv) analysis. From the searches, a volume of 17,297 articles were retrieved, and only eight (8) papers were considered relevant for the current research. In summary, among the selected studies, it was observed that with copper recoveries higher than 90% in two or three separation stages.

Keywords: Recycling; Printed Circuit Boards (PCB); Solvent extraction; Copper.

¹ *Graduanda em Engenharia Metalúrgica, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.*

² *Doutorando em Engenharia de Materiais, Rede Temática em Engenharia de Materiais (REDEMAT), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.*

³ *Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, observou-se um aumento do uso de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (EEE) e, conseqüentemente uma alta geração de Resíduos de destes equipamentos, conhecidos como REEE [1]; isto se deve à obsolescência programada que se consolidou como uma estratégia da indústria para o crescimento de suas vendas [2]. Por essa razão, a reciclagem desses resíduos tem se tornado uma temática de grande discussão no século XXI, despertando o interesse de diversas organizações governamentais e também do setor privado [3].

Dentre os diversos REEE, destacam-se as Placas de Circuito Impresso (PCI), as quais constituem cerca de 5% da sucata eletrônica total gerada [4]. As PCI apresentam uma composição bastante heterogênea, geralmente sendo compostas por materiais poliméricos, cerâmicos e metálicos, e possuindo alto potencial de reciclagem devido à alta concentração de metais (cerca de 10% a 20% de cobre, 1% a 5% de chumbo, 1% a 3% de níquel e 0,3% a 0,4% de metais nobres, tais como ouro, prata, platina, entre outros) [5].

A maior parte das PCI são incineradas ou descartadas de maneira inadequada em aterros sanitários. Isso gera um grande desafio contêm muitas substâncias tóxicas que, se não descartadas adequadamente, podem causar sérios impactos ambientais e problemas ligados a saúde pública [6,7].

Nos últimos anos, foram desenvolvidos diversos estudos visando à recuperação de metais presentes em PCI [8]. Estas placas podem ser processadas por meio de rotas pirometalúrgicas ou hidrometalúrgicas. O processamento pirometalúrgico é conveniente para reciclar metais como cobre, ferro, níquel, entre outros, em operações de larga escala. A grande problemática de se empregar essa técnica é a potencial geração gases de efeito estufa, dioxinas e furanos [9]. Por outro lado, a recuperação de metais por meio de processos hidrometalúrgicos tem alcançado um importante espaço, principalmente devido à simplicidade, menor gasto energético e menor geração de gases tóxicos, se comparada a outros processos disponíveis [10]. Ademais, vale ressaltar que ambos os processos possuem vantagens e desvantagens tornando o seu uso combinado, muitas vezes, o cenário preferido.

A lixiviação é a primeira etapa do processamento hidrometalúrgico, em que os metais de interesse presentes em componentes sólidos são transferidos para uma solução aquosa pela ação de um lixiviante [11]. Ao final da etapa de lixiviação, tem-se a geração de um licor, o qual precisa passar por um processo de purificação com o objetivo de remover substâncias indesejáveis e aumentar a concentração do metal de interesse. Os processos mais comuns para purificação de licores de lixiviação são: precipitação, adsorção em carvão ativado ou em resinas poliméricas de troca iônica e extração por solventes, conforme mostrado na Tabela 1 [12].

Tabela 1. Processos comumente empregados para purificação de licores de lixiviação.

Método de separação	Princípio básico	Vantagem	Desvantagem	Referência
Troca iônica	Troca reversível de íons entre a fase sólida polimérica e a fase aquosa	Vários tipos de resina, o que permite seletividade; Eficaz para a remoção de cátions e ânions e fácil de automatizar	Os trocadores de íons são rapidamente poluídos o que reduz a capacidade de troca e custo operacional relativamente alto	[13]
Adsorção seletiva	É o processo de transferência de um ou mais constituintes (adsorvatos) de uma fase fluida para a superfície de uma fase sólida (adsorvente)	Eficaz e econômico	Limitado pelos fenômenos de difusão e geração de resíduos	[13]
Precipitação química	Metais em solução são separados da mesma por meio da formação de precipitados, obtidos pela adição de agentes químicos específicos	Simple e baixo custo de capital	Não aplicável a todos os casos; Geração de resíduos e dificuldade para fazer separação sólido-líquido	[13,14]
Extração por solventes	Diferença de solubilidade em solventes distintos	Utiliza equipamento relativamente simples; Pode utilizar um número grande de solventes puros e disponíveis comercialmente e realizada em temperatura ambiente	Necessita de espaço; Alto consumo de energia; As amostras com alta afinidade pela água são parcialmente extraídas pelo solvente orgânico, resultando em perdas; impurezas do solvente são concentradas junto com a amostra; Volumes relativamente grandes de amostras e solventes são requeridos	[13, 15]

A Extração por Solventes (ES) é uma das técnicas de purificação de soluções mais utilizadas, devido a sua simplicidade, rapidez e menor impacto ambiental. O processo ocorre por meio do contato entre duas fases líquidas (aquosa e orgânica), imiscíveis, onde a fase aquosa contém as espécies metálicas (solutos) que se pretende extrair e a fase orgânica contém os reagentes que extraem seletivamente as espécies [16]. A fase orgânica é constituída por uma substância denominada extratante, que é responsável por promover a transferência do metal da fase aquosa para a fase orgânica [17] e pode ser agrupada em quatro classes: (i) extratantes ácidos, (ii) extratantes básicos ou de troca aniônica, (iii) extratantes de solvatação e (iv) extratantes quelantes [18].

A escolha do extratante adequado é crucial, pois este é o fator de maior influência no desempenho e custo do processo de extração líquido-líquido. Os principais requisitos para essa seleção são seletividade, capacidade de extração, facilidade de reextração e de separação. Também devem ser levados em consideração aspectos de segurança, tais como toxicidade, inflamabilidade e volatilidade [19,20]. Além disso, os extratantes são diluídos em algum solvente orgânico de baixo custo

(diluente), com o objetivo de diminuir sua viscosidade. Em alguns casos, tem-se a mistura de dois extratantes, originando um extratante misto que pode ter propriedade melhores que as propriedades individuais. Esse fenômeno é conhecido como sinergismo [18].

Neste sentido, este trabalho tem por objetivo apresentar uma revisão sistemática acerca do tema e descrever alguns casos que empregaram a técnica de ES visando a separação seletiva de cobre presente em licores de lixiviação de PCI, bem como identificar em quais condições experimentais e com quais extratantes foram obtidos os maiores números de sucessos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho trata-se de uma revisão da literatura seguindo o conceito de revisão sistemática. A revisão sistemática é um método de investigação científica que reúne estudos relevantes sobre um assunto, utilizando o banco de dados da literatura que trata sobre aquele assunto como fonte, com intuito de fazer análises sistemáticas e realizar uma revisão crítica e abrangente da literatura [21].

A metodologia aplicada para o estudo da separação seletiva de cobre presente em PCI, via extração por solventes, envolveu quatro passos principais: (i) identificação, (ii) busca, (iii) seleção e (iv) análise, conforme descritos na Figura 1.

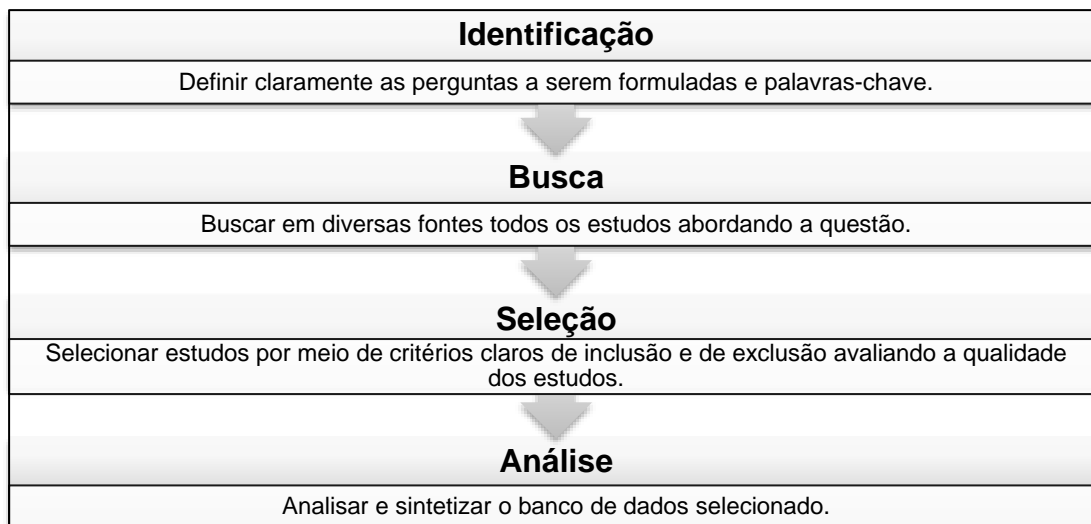


Figura 1. Passos para a revisão sistemática.

As perguntas que nortearam este trabalho foram:

“Quais foram os casos de sucesso de separação seletiva de cobre usando o método de extração por solventes? Em quais condições e para qual tipo de extratantes foram obtidos os maiores número de sucessos?”

Diante das perguntas norteadoras selecionaram-se palavras-chave, com o objetivo de nortear as buscas na literatura. Tais termos foram: Recycling; Printed Circuit Boards (PCB); Solvent extraction AND Copper. De posse das palavras-chave, realizaram-se as pesquisas nas principais bases acadêmicas: Google Scholar, Scielo, ScienceDirect, Scopus e Web of Science.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados encontram-se discutidos detalhadamente por fase de execução, conforme apresentado na Figura 2.

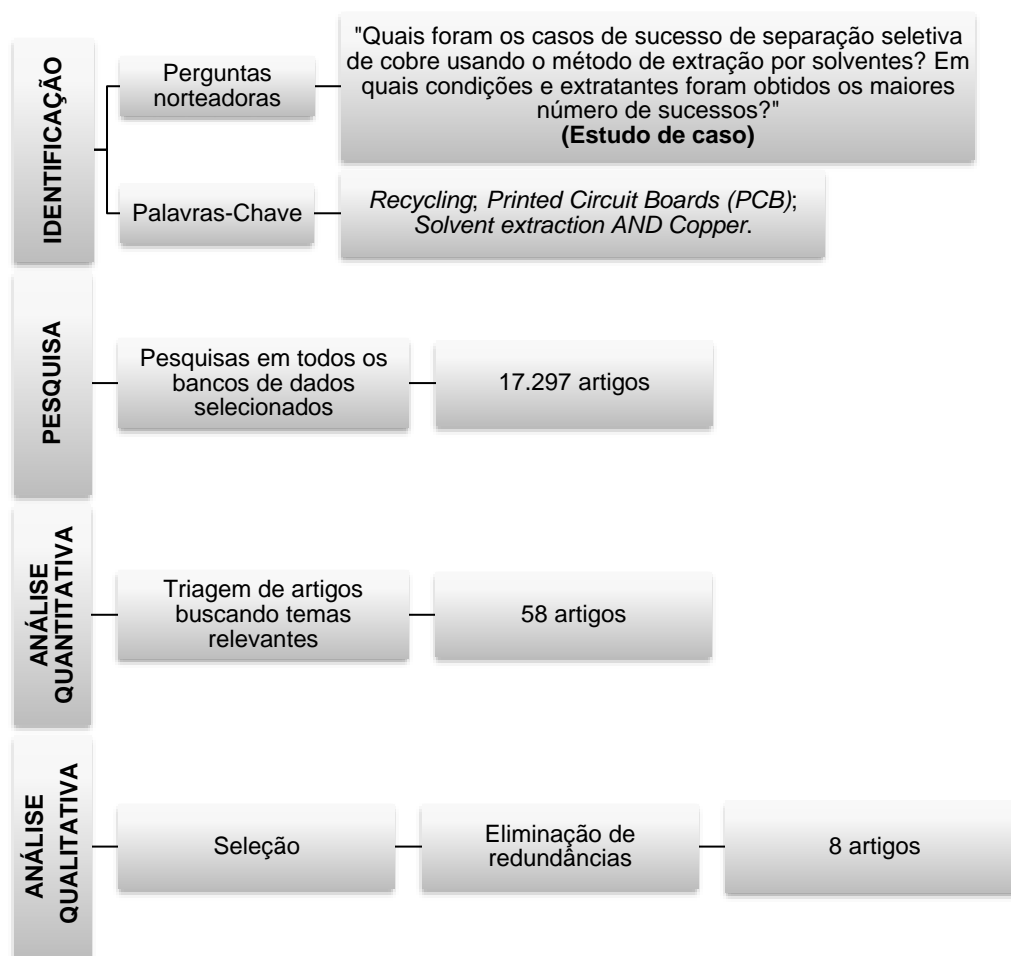


Figura 2. Fluxograma com as etapas do levantamento bibliográfico.

3.1 Busca e Seleção

As buscas foram realizadas com as palavras-chaves definidas anteriormente, gerando um volume de 17.297 artigos. Todavia, apesar do grande número de artigos encontrados, poucos foram considerados relevantes para o tema abordado, levando-se em conta o resumo e a pergunta norteadora. Salienta-se que após leitura dos artigos, foram selecionados oito (8) artigos, os quais serão usados como base para a construção do presente trabalho. A Tabela 2 apresenta as bases de dados utilizadas, bem como as palavras-chave e os números de artigos relevantes e selecionados.

Tabela 2. Resultados da busca nos bancos de dados utilizando as palavras-chave *Recycling; Printed Circuit Boards (PCB); Solvent extraction AND Copper*, bem como seleção de artigos relevantes.

Base de dados	Palavras-Chave	Número de artigos	Número de artigos relevantes	Número de artigos selecionados
Google Scholar		16.800	37	2
Scielo	<i>Recycling; Printed</i>	1	1	1
ScienceDirect	<i>Circuit Boards (PCB);</i>	479	11	3
Scopus	<i>Solvent extraction AND</i>	17	9	2
Web of Science	<i>Copper.</i>	0	0	0

3.2 Análise Quantitativa

Nas buscas realizadas nos bancos de dados a partir das palavras chave foi encontrado um grande volume de artigos. Com a finalidade de refinar a pesquisa, foi realizada uma triagem para selecionar os artigos que poderiam auxiliar na resposta da pergunta norteadora e, com base nos títulos e resumos, foram selecionados 58 artigos considerados relevantes para o objetivo do trabalho.

3.3 Análise Qualitativa

Após a pré-seleção, realizou-se a leitura dos artigos a fim de eliminar redundâncias e selecionaram-se oito (8) artigos, os quais foram utilizados para a elaboração e construção deste trabalho. Salienta-se que as informações foram extraídas e sistematizadas por meio de tabela.

A Tabela 3 apresenta a síntese dos artigos selecionados, os quais investigaram a separação seletiva de cobre por meio de extração por solventes.

Tabela 3. Síntese dos oito artigos selecionados (continua).

Amostra	Extratante	Condições experimentais	Resultado	Referência
Licor de ácido sulfúrico proveniente de PCI (21,59 g.L ⁻¹ de Cu, 0,26 g.L ⁻¹ de Ni, 0,003 g.L ⁻¹ de Co, 1,5 g.L ⁻¹ de Zn, 0,002 g.L ⁻¹ de Cd e 0,85 g.L ⁻¹ de Fe)	ACORGA M5640 diluído em querosene	pH = 1,7 Relação A/O ¹ = 1/2 20% de extratante Número de estágios: 2 Tempo: 5 minutos	Recuperação de 100% de cobre	[22]
Licor de ácido sulfúrico proveniente de PCI (3,5 g.L ⁻¹ de Cu e 0,35 g.L ⁻¹ de Ni)	LIX 664N diluído em querosene	pH = 2 Relação A/O = 1/1 30% de extratante Número de estágios: 2 Tempo: n.m ²	Recuperação de 98,5% de cobre	[23]
Licor de sulfato de amônio de PCI (22,175 g.L ⁻¹ de Cu, ~ 0,003 g.L ⁻¹ de Fe e < 0,7 g.L ⁻¹ de Zn e Pb)	LIX 84 diluído em querosene	pH = 10 Relação A/O = n.m 50% de extratante Número de estágios: n.m Tempo: 3 minutos	Recuperação de 99,6% de cobre	[24]

¹A/O: Relação da fase aquosa/fase orgânica;

²n.m: não mencionado.

Tabela 3. Síntese dos oito artigos selecionados (continuação).

Amostra	Extratante	Condições experimentais	Resultado	Referência
Licor de ácido sulfúrico de PCI (1,2 g.L ⁻¹ de Al, 31,7 g.L ⁻¹ de Cu, 0,003 g.L ⁻¹ de Fe, 0,11 g.L ⁻¹ de Ni e 2,9 g.L ⁻¹ de Zn)	D ₂ EHPA diluído em <i>iberfluid</i>	pH = 3,5 Relação A/O = 1/1 20% de extratante Número de estágios: 2 Tempo: 10 minutos	Recuperação de 100% de cobre, desde que alumínio e zinco sejam previamente extraídos	[25]
Licor de ácido nítrico de PCI (42,11 g.L ⁻¹ de Cu, 2,12 g.L ⁻¹ de Fe, 4,02 g.L ⁻¹ de Pb, 1,58 g.L ⁻¹ de Zn e 0,4 g.L ⁻¹ de Ni)	LIX 984N diluído em querosene	pH = 1,5 Relação A/O = 1/1,5 50% de extratante Número de estágios: 3 Tempo: 2 minutos	Recuperação de 99,7% de cobre	[26]
Licor de lixiviação de PCI (6,17 g.L ⁻¹ de Cu, 1,63 g.L ⁻¹ de Zn, 0,55 g.L ⁻¹ de Pb, 0,12 g.L ⁻¹ de Al, 0,09 g.L ⁻¹ de Ni, 1,3 g.L ⁻¹ de Sn, 2,3 g.L ⁻¹ de Na, 57,5 g.L ⁻¹ de Fe e 191,4 g.L ⁻¹ de Cl)	ACORGA M5640 diluído em querosene	pH = 1,1 Relação A/O = 1/1 16% de extratante Número de estágios: n.m Tempo: 3 minutos	Recuperação de cobre superior a 90%	[27]
Licor de ácido sulfúrico de PCI (34,26% de Cu, 2,45% de Fe, 0,43% de Ni e 1,11% de Pb)	LIX 84IC diluído em querosene	pH = 2,5 Relação A/O = 1/1 10% de extratante Número de estágios: 3 Tempo: 5 minutos	Recuperação de 99,99% de cobre	[28]
Licor de lixiviação de PCI (2 g.L ⁻¹ de Cu, 6 g.L ⁻¹ de Pb e 4 g.L ⁻¹ de Sn)	CP-150 em querosene	pH = 3 Relação A/O = 1/3 20% de extratante Número de estágios: 3 Tempo: 30 minutos	Recuperação de 99,99% de cobre	[29]

¹A/O: Relação da fase aquosa/fase orgânica;

²n.m: não mencionado.

A partir da Tabela 3, nota-se que diferentes extratantes foram empregados para a recuperação de cobre presentes em licores de lixiviação de PCI. Todavia, 50% dos artigos selecionados empregaram extratantes da família LIX [23, 24, 26, 28]. De maneira geral, os resultados indicaram recuperações de cobre satisfatórias, como sendo superiores a 90%.

Kumar et al. [23] estudaram a separação de cobre e níquel presentes em PCI empregando o extratante LIX 664N diluído em querosene. A solução de alimentação foi preparada de modo a conter 3,5 g.L⁻¹ de cobre e 0,35 g.L⁻¹ de níquel em meio sulfato. Os experimentos demonstraram que 30% de LIX 664N em querosene, pH igual a 2, relação A/O de 1/1 apresentou uma alta seletividade para a extração de cobre versus níquel, resultado em 98,5% de recuperação de cobre para operação em dois estágios. Além disso, a cinética para extração foi favorável e, conseqüentemente, os dois metais podem ser facilmente separados.

Foi estudado [24] um processo hidrometalúrgico visando a recuperação dos componentes metálicos contidos nas PCI. Os resíduos foram primeiramente submetidos a etapas de processamento mineral, (britagem, moagem, separação eletrostática, separação por gravidade e separação magnética). Em seguida, foi feita

a lixiviação das PCI cominuídas com amônia/sulfato de amônio obtendo-se um licor composto por 22,17 g.L⁻¹ de cobre, aproximadamente 0,003 g.L⁻¹ de ferro e menos de 0,7 g.L⁻¹ de zinco e chumbo. Este licor foi tratado por extração por solvente, utilizando-se LIX 84 diluído em querosene. Os ensaios foram realizados sob as seguintes condições experimentais: 50% de extratante, pH igual a 10. Um período igual a 3 minutos foi suficiente para que 99,6% de cobre fosse recuperado do lixiviado.

Lee et al. [26] estudaram a recuperação seletiva de cobre presentes em PCI por extração por solventes após redução de tamanho e lixiviação com ácido nítrico. A composição do licor de lixiviação obtido foi de 42,11 g.L⁻¹ de cobre, 2,12 g.L⁻¹ de ferro, 4,02 g.L⁻¹ de chumbo, 1,58 g.L⁻¹ de zinco e 0,4 g.L⁻¹ de níquel. Os ensaios foram realizados em três estágio sob a simulação de contracorrente, em pH igual a 1,5, empregando 50% de LIX 984N na relação de fases A/O de 1/1,5 e foi obtida uma extração de 99,7% de cobre.

As recuperações de cobre, níquel e ferro presentes em PCI de foram investigadas [28]. A composição do licor de lixiviação foi de 34,26% de cobre, 2,45% de ferro, 0,43% de níquel, 1,11% de chumbo. Após a recuperação de níquel e ferro contido no licor de lixiviação, a solução foi processada visando a extração do cobre empregando 10% de LIX 84IC diluído em querosene. Os autores verificaram que ao realizar a extração por solventes em dois estágios, pH igual a 2,5, relação A/O de 1/1 durante um período de 5 minutos, foi possível obter uma recuperação de 99,99% de cobre.

Em se tratando do tempo de contato entre as fases aquosa e orgânica, observou-se que os tempos são inferiores a 10 min os autores [22, 24, 26 - 28]. O querosene foi empregado como diluente por 87,5% dos autores selecionados, sendo o trabalho da referência [25] o único a utilizar um diluente diferente (iberfluid). Além disso, os valores de pH utilizados na maioria dos estudos encontram-se compreendidos entre 1,1 e 3,5. Isso se deve ao fato dos licores provenientes da lixiviação de PCI serem, em sua maioria, ácidos.

A relação entre as fases aquosa e orgânica é fundamental para a viabilidade do processo de extração por solvente. Esta por sua vez foi definida por 50% dos autores em 1/1. Vale ressaltar que maiores frações de fase orgânica podem ser viabilizadas quando levadas em considerações as características do extratante, tais como seletividade, capacidade de extração, facilidade de reextração. Ademais, pode-se concluir que o número de estágios entre dois e três é, em geral, adequado para a recuperação de cobre via extração por solventes.

4 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar da grande quantidade de artigos encontrados, poucos se mostraram relevantes para o estudo de separação seletiva de cobre presentes em licores de lixiviação de PCI por meio de extração por solventes. Dentre ele, foram selecionados oito artigos mais relevantes, sobre os quais foi embasado o presente trabalho.

O estudo procurou balizar as experiências na separação seletiva de cobre presente em licores de lixiviação de PCI, estudando as metodologias aplicadas para a busca que envolvem os quatro passos principais: (i) identificação, (ii) busca, (iii) seleção e (iv) análise.

O estudo mostrou que são satisfatórias as metodologias utilizadas para a separação do cobre com uma recuperação em torno de 90%, com melhores resultados para o emprego dos extratantes da família LIX. Estes foram mais empregados sob as

seguintes condições experimentais: pH ácido, com relação de fase A/O de 1/1, tempos menores que 5 minutos e 2 ou 3 estágios de extração.

Propõe-se um maior esforço para o aumento da reciclagem REEE, com um levantamento mais detalhado de dados para construção de um modelo estatístico que aponte para os resultados de forma a contribuir efetivamente para a reciclagem de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE).

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES pela oferta de bolsa de pós-graduação a um dos autores; e também ao CNPq, FINEP, FAPEMIG e UFOP. Esta pesquisa não recebeu nenhuma concessão específica de agências de financiamento nos setores público, comercial ou sem fins lucrativos.

REFERÊNCIAS

- 1 Veit HM, Bernardes AM, Ferreira JZ, Tenório JAS, Malfatti CF. Recovery of copper from printed circuit boards scraps by mechanical processing and electrometallurgy. *Journal of Hazardous Materials*. 2006; 137(3): 1704-1709.
- 2 Silva MBOD. Obsolescência programada e teoria do decrescimento versus direito ao desenvolvimento e ao consumo (sustentáveis). *Veredas do Direito*. 2012; 9(17): 181-196.
- 3 Robinson BH. E-waste: An assessment of global production and environmental impacts. *Science of The Total Environment*. 2009; 408(2): 183-191.
- 4 Jiang P, Harney M, Song Y, Chen B, Chen Q, Chen T, Lazarus G, Dubois LH, Korzenski MB. Improving the End-of-Life for Electronic Materials via Sustainable Recycling Methods. *Procedia Environmental Sciences*. 2012; 16: 485-490.
- 5 Ilyas S, Ruan C, Bhatti HN, Ghauri, MA, Anwar MA. Column bioleaching of metals from electronic scrap. *Hydrometallurgy*. 2010; 101(3): 135-140.
- 6 Marques AC, Cabrera JM, Malfatti CF. Printed circuit boards: A review on the perspective of sustainability. *Journal of Environmental Management*. 2013; 131: 298-306.
- 7 Gu Y, Wu Y, Xu M, Mu X, Zuo T. Waste electrical and electronic equipment (WEEE) recycling for a sustainable resource supply in the electronics industry in China. *Journal of Cleaner Production*. 2016; 127: 331-338.
- 8 Xiu FR, Zhang FS. Materials recovery from waste printed circuit boards by supercritical methanol. *Journal of Hazardous Materials*. 2010; 178(1): 628-634.
- 9 Pereira MM. Desenvolvimento de uma rota tecnológica envolvendo processamentos mecânico e hidrometalúrgico para a extração de prata presente em placas de circuito impresso [dissertação]. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP; 2019
- 10 Chen X, Chen Y, Zhou T, Liu D, Hu H, Fan S. Hydrometallurgical recovery of metal values from sulfuric acid leaching liquor of spent lithium-ion batteries. *Waste Management*. 2015; 38: 349-356.
- 11 Tasker PA, Tong CC, Westra AN. Co-extraction of cations and anions in base metal recovery. *Coordination Chemistry Reviews*. 2007; 251: 1868-1877.
- 12 Costa CBD, Carrisso R, Sousa JCS. Planejamento de experimentos de extração por solventes de elementos de terras raras médio-pesados. XX - Jornada de Iniciação Científica. CETEM/MCT. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: 4 p. 2012.
- 13 Fu F, Wang Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*. 2011; 92(3): 407-418.
- 14 Zainol Z, Nicol MJ. Ion-exchange equilibria of Ni²⁺, Co²⁺, Mn²⁺ and Mg²⁺ with iminodiacetic acid chelating resin Amberlite IRC 748. *Hydrometallurgy*. 2009; 99(3): 175-180.

- 15 Queiroz SCN, Collins CH, Jardim ICSF. Métodos de extração e/ou concentração de compostos encontrados em fluidos biológicos para posterior determinação cromatográfica. *Química Nova*. 2001; 24: 68-76.
- 16 Habashi F. Principles of Extractive Metallurgy, vol. 4. 1998. Amalgam and Electrometallurgy. Métallurgie Extractive Québec, distributed by Laval University Bookstore.
- 17 Carvalhido CA, Pedrosa MF, Martins AH. Extração por solventes aplicada à remoção de metais pesados presentes no licor de lixiviação do minério de manganês da Mina do Azul (PA). *Revista Escola de Minas*. 2001; 54: 227-231.
- 18 Gupta CK. Chemical Metallurgy: Principles and Practice. 1.ed. Mumbai, India: Wiley-VCH Verlag, Germany; 2003.
- 19 Ritcey GM, Ashbrook AW. Solvent extraction: principles and applications to process metallurgy. Universidade de Michigan: Elsevier. 1984. 362 p.
- 20 Vera YM. Separação de terras-raras a partir da extração por solvente: Revisão sobre o uso dos extratantes ácidos organofosforados. Rio de Janeiro, Brasil: CETEM/MCTI. 2015. 57 p.
- 21 Sousa MR, Ribeiro ALP. Systematic Review and Meta-analysis of Diagnostic and Prognostic Studies: A Tutorial. *Arquivos Brasileiros de Cardiologia*. 2009; 92(3): 241-251.
- 22 Agrawal A, Perween M, Pramanick S, Sahu KK. Recovery of copper from PCB leach solution by solvent extraction. In: Proceedings of the XII International Seminar on Mineral Processing Technology (MPT-2011), 2011; Udaipur, India. P. 1189–1194.
- 23 Kumar R, Shah DJ, Tiwari KK. Separation of Copper and Nickel by Solvent Extraction Using LIX 664N. *Journal of Environmental Protection*. 2013; 4: 315-318.
- 24 Yang J, Wu Y, Li J. Recovery of ultrafine copper particles from metal components of waste printed circuit boards. *Hydrometallurgy*. 2012; 121-124: 1-6.
- 25 Correa MMJ, Silvas FPC, Aliprandini P, Moraes VT, Dreisinger D, Espinosa DCR. Separation of copper from a leaching solution of printed circuit boards by using solvent extraction with D2EHPA. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2018; 35(3): 919–930.
- 26 Le HL, Jeong J, Lee JC, Pandey BD, Yoo JM, Huyunh TH. Hydrometallurgical Process for Copper Recovery from Waste Printed Circuit Boards (PCBs). *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review: An International Journal*. 2011; 32(2): 90-104.
- 27 Wang L, Li Q, Sun X, Wang L. Separation and recovery of copper from waste printed circuit boards leach solution using solvent extraction with Acorga M5640 as extractant. *Separation Science and Technology*. 2018; 1-10.
- 28 Kumari A, Jha MK, Lee J, Singh RP. Clean process for recovery of metals and recycling of acid from the leach liquor of PCBs. *Journal of Cleaner Production*. 2016; 112(5): 4826-4834.
- 29 Kavousi M, Sattari A, Alamdari EK, Firozi S. Selective separation of copper over solder alloy from waste printed circuit boards leach solution. *Waste Management*. 2017; 60: 636-642.