

RECICLAGEM DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO VISANDO RECUPERAÇÃO DE PRATA: ESTUDO DE UMA ROTA HIDROMETALÚRGICA

Marcos Paulo Kohler Caldas ¹

Viviane Tavares de Moraes ²

Eduardo Junca ²

Jorge Alberto Soares Tenório ²

Denise Croce Romano Espinosa ²

Resumo

Este trabalho teve como objetivo realizar a caracterização de placa de circuito impresso de computadores e propor uma rota hidrometalúrgica para recuperação da prata presente em sua composição. Para o desenvolvimento deste trabalho, a placa foi cominuída em moinhos de facas e de martelo. Em seguida, foi realizada a caracterização do material cominuído através de análise granulométrica, lixiviação em água régia, análise química por espectrometria de emissão óptica com acoplamento de plasma induzido (ICP-OES) e perda ao fogo. Por fim, foram realizados ensaios de lixiviação em ácido sulfúrico, ácido sulfúrico em meio oxidante e ácido nítrico. Os resultados indicaram que a placa é composta principalmente por cobre (19,42%). Além disso, foi encontrado um teor de prata de 0,045%. A rota para recuperação da prata envolveu a lixiviação em ácido sulfúrico a 75°C por 18 horas, lixiviação em ácido sulfúrico em meio oxidante a 75°C por 6 horas e lixiviação em ácido nítrico a temperatura ambiente por 2 horas. Utilizando esta rota foi possível uma recuperação de 96,6% da prata.

Palavra-chave: Reciclagem; Recuperação de prata; Hidrometalurgia.

RECYCLING OF PRINTED CIRCUIT BOARDS AIMING SILVER RECOVERY: A HYDROMETALLURGICAL ROUTE STUDY

Abstract

The aim of this paper is characterize printed circuit board of computers and propose a hydrometallurgical route for silver recovery present in its composition. Initially, the printed circuit board was comminuted in both knife and hammer mills. The comminuted material was characterized by sieve analysis, chemical analysis by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) and loss on ignition. Leaching tests were conducted in sulfuric acid, sulfuric acid in an oxidizing medium and nitric acid. The results indicated that the printed circuit board is mainly composed of copper (19.42%). Silver content of 0.045% was found. The route for silver recovery was leaching in sulfuric acid at 75°C for 18 hours. Then, leaching in sulfuric acid at 75°C in an oxidizing medium for 6 hours and nitric acid leaching at room temperature for 2 hours. Through of this route, 96.6% of silver was recovered.

Keywords: Recycling; Recovery of silver; Hydrometallurgy.

I INTRODUÇÃO

O consumo desenfreado e o ritmo acelerado da tecnologia trazem como consequência a obsolescência programada, que, aliado com o fim da vida útil e ocorrências de defeitos, transformam os equipamentos eletroeletrônicos em sucatas eletrônicas [1-4]. A geração crescente deste

resíduo tem evoluído para um problema ambiental, onde a preocupação está relacionada à lista de elementos químicos contidos nas sucatas eletroeletrônicas (muitos tóxicos tais como: mercúrio, chumbo, arsênio), e a disposição incorreta desses resíduos [5,6].

¹Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Espírito Santo - IFES, Serra, ES, Brasil. E-mail: marcospaulo@ifes.edu.br

²Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP, São Paulo, SP, Brasil.

Quando as sucatas são dispostas em aterros sanitários, por exemplo, agravam-se ainda mais a situação, pois com a disposição de elementos químicos que sofrem processo de lixiviação provocado pelos ácidos graxos (provenientes da degradação da matéria-orgânica), pode ocorrer à contaminação do solo e lençóis freáticos [7].

A contaminação pode promover alterações consideráveis nos aspectos físicos, químicos e biológicos, tanto no corpo receptor (solo, água, ar) quanto no metal, ou seja, dependendo das condições ambientais o metal pode sofrer alterações tais como: densidade, toxicidade, dentre outras propriedades físico-químicas, proporcionando o desequilíbrio ecológico [8]. Para evitar a disposição incorreta desses resíduos, diversas alternativas vêm sendo aplicadas, umas delas é a minimização dos impactos ambientais através da reciclagem e recuperação dos metais preciosos presentes nas sucatas tecnológicas [9, 10].

Recentemente, recuperar metais preciosos a partir de resíduos de placas de circuito impresso (PCI) tornou-se algo de interesse das empresas, isso porque os metais preciosos e o cobre representam mais de 95% do valor total intrínseco da placa, além de sua concentração no resíduo ser de até 10 vezes maior que nos minérios [11-13]. Para a empresa, é a oportunidade de praticar o desenvolvimento sustentável adquirindo matéria-prima, que se encontra escassa na natureza, a partir de um resíduo [14,15]. O desenvolvimento sustentável é um dos alavanches para a prática de reciclagem de equipamentos eletroeletrônicos obsoletos. Três dos desafios da gestão de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) é exatamente o tripé da sustentabilidade (preservação do meio ambiente, reuso e remanufatura de REEE e inclusão dos catadores gerando emprego e renda, e também uma forma da empresa fazer *marketing* ambiental) [16].

Esse artigo aborda a recuperação da prata presente nas de placas de circuito impresso, apresentando o passo a passo do processo hidrometalúrgico, tendo como principal objetivo a alternativa de recuperar a prata presente em REEE, minimizando assim, a extração de recursos naturais.

A falta de tecnologia no mercado e a maximização de REEE contendo metais preciosos foram à razão pela qual esse artigo foi desenvolvido.

No processo hidrometalúrgico, o fator tempo de reação, temperatura e concentração do ácido foi fundamental para a eficiência da dissolução prata. Outro fator que otimizou o estudo foi à eliminação da técnica de separação magnética para retirada dos materiais ferromagnéticos [17].

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Processamento Manual

Para desenvolvimento deste estudo foi solicitada ao CEDIR-USP (Centro de Descarte e Reuso de Resíduos de Informática) a doação placas de circuito impresso, provenientes

de computadores obsoletos. Inicialmente as placas de circuito impresso foram desmanteladas manualmente, retirando-se partes móveis como dissipadores de calor, suporte dos processadores e parafusos. Apenas as placas de circuito impresso juntamente com os componentes soldados a elas foram mantidas para dar sequência ao processamento físico e caracterização. Foram selecionadas 5,035 kg de placas de circuito impresso sem chumbo (*lead free*) para esta pesquisa. Um fluxograma simplificado do desenvolvimento do trabalho está descrito na Figura 1.

2.2 Processamento Físico

No processamento físico, foi utilizado o moinho de facas com grelha de 9 mm, seguido de moagem em moinho de martelos com grelha de 2 mm, tendo como finalidade a redução do tamanho, aumento da área superficial e liberação dos materiais das placas de circuito impresso, facilitando a recuperação de metais [18]. Após a moagem, foi feito o quarteramento da amostra até obtenção de frações de 20 g. Na sequência, uma amostra de 10 g de placa de circuito impresso foi submetida a classificação granulométrica com peneiras vibratórias com malhas de 4,00 mm; 2,00 mm; 1,00 mm; 0,500 mm; 0,250 mm; 0,125 mm; 0,075 mm; 0,038 mm e fundo.

2.3 Caracterização

Através da caracterização, identificaram-se quais metais contidos nas placas de circuito impresso, assim como sua quantificação. Utilizou-se para tal experimento digestão em água régia com análise química por ICP-OES e perda ao fogo, onde foi identificado, também, a fração orgânica e inorgânica da amostra.

2.3.1 Digestão em água régia e análise química

Da amostra obtida no processamento físico, 5 g foi solubilizada em 100 mL de água régia, durante 24 horas em temperatura ambiente.

Após digestão, a amostra foi filtrada em papel de filtro quantitativo de filtragem rápida; nesse procedimento obteve-se: o licor, no qual tem-se água-régia e metais solubilizados e a amostra sólida pós-digestão retida no papel de filtro, que corresponde aos sólidos não solúveis, isto é, materiais cerâmicos e poliméricos.

O licor obtido na digestão foi enviado para análise química por ICP-OES. Os metais analisados foram: Ag, Al, Au, Cu, Fe, Ni, Sn e Zn.

2.3.2 Ensaio de perda ao fogo

O ensaio de perda ao fogo foi utilizado para determinação de componentes orgânicos e inorgânicos. Nesse procedimento, pesou-se, em uma balança analítica, uma fração de 1,17 g da amostra sólida do ensaio anterior,

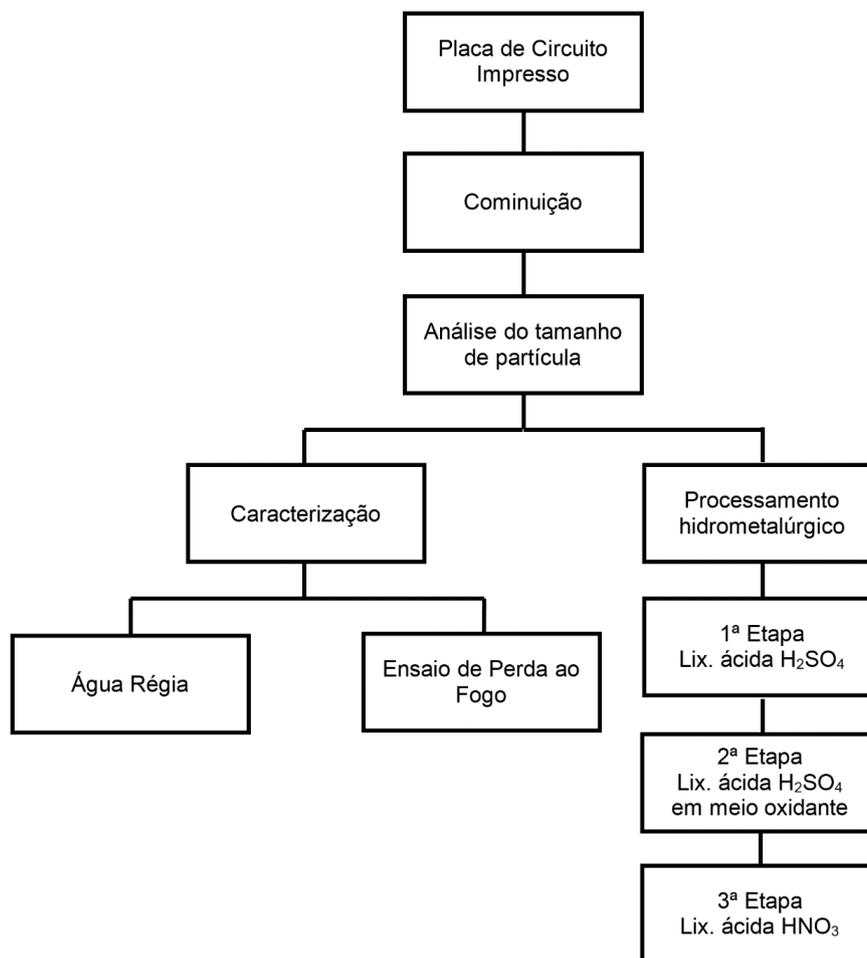


Figura 1. Fluxograma simplificado do desenvolvimento do trabalho.

que foi colocada em navículas de porcelana. Em seguida, as navículas foram levadas a um forno tipo mufla a 800°C por 1 hora, em atmosfera ambiente. Após isso, a amostra foi retirada e pesada novamente para cálculo de perda de massa.

2.4 Processamento Hidrometalúrgico

Após a identificação dos metais presentes na placa de circuito impresso, passou-se a fase de processamento hidrometalúrgico dividido em três etapas: lixiviação com ácido sulfúrico; lixiviação com ácido sulfúrico em meio oxidante e lixiviação em ácido nítrico.

Após cada etapa de lixiviação foi retirada alíquota de 50 mL do licor para análise química de ICP-OES.

Durante os processos de lixiviação o ensaio se manteve sob agitação mecânica constante em sistema fechado.

2.4.1 Lixiviação ácida

A amostra quarteada de aproximadamente 35 g foi imersa em 350 mL de ácido sulfúrico 1 M a temperatura de 75°C por 18 horas. O licor lixiviado foi filtrado num papel de filtro quantitativo de filtragem rápida.

O filtrado foi armazenado e o material retido no papel de filtro foi lavado com água deionizada. Em seguida, o não lixiviado foi mantido em uma estufa durante 24 horas a 60°C para secagem do mesmo. Por fim, foi realizada a pesagem do não lixiviado. A Figura 2 detalha o esquema utilizado nas três etapas de lixiviação e apresenta o resíduo antes de passar por cada uma dessas etapas.

2.4.2 Lixiviação ácida em meio oxidante

O resíduo obtido da lixiviação ácida foi submetido à lixiviação ácida em meio oxidante, com ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio. Para a lixiviação do cobre; foi utilizado uma relação 1:10 (Sólido/Líquido).

Durante a lixiviação, foi adicionado 10 mL de peróxido de hidrogênio (130 volumes) a cada 30 minutos até completar 6 horas de lixiviação a 75°C. Após a lixiviação, o material em contato com o ácido em meio oxidante foi filtrado num papel de filtro quantitativo de filtragem rápida.

O filtrado foi armazenado e o material retido no papel de filtro foi lavado com água deionizada, e então encaminhado para uma estufa durante 24 horas a 60°C para secagem. Por fim, foi realizada a pesagem do não lixiviado.

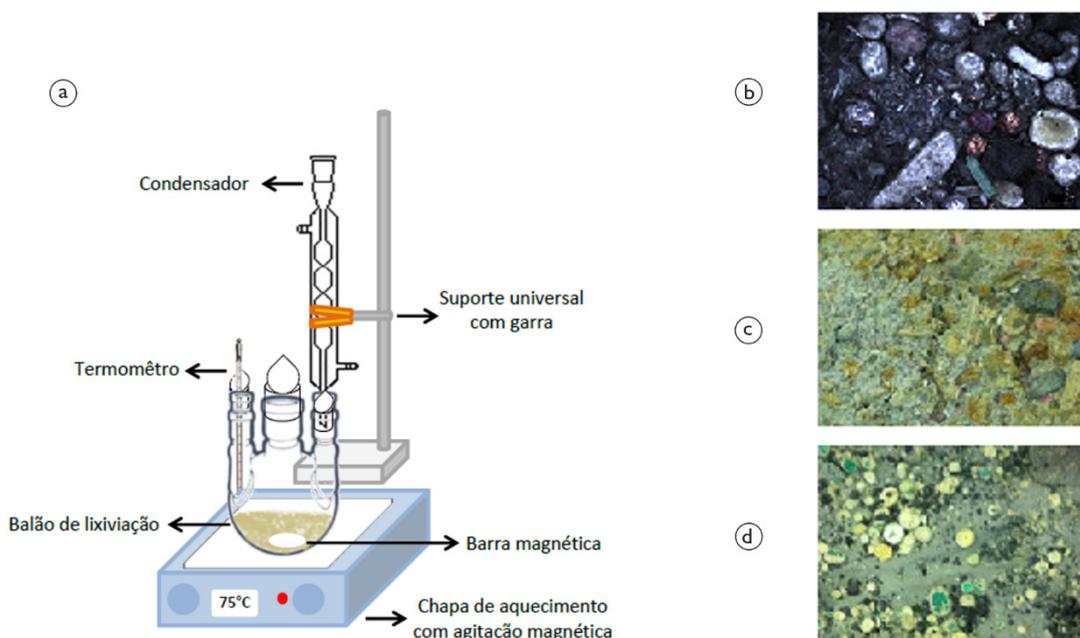


Figura 2. (a) Esquema do processamento hidrometalúrgico utilizado nas etapas de lixiviação [19]; (b) resíduo a ser lixiviado em ácido sulfúrico; (c) resíduo a ser lixiviado em ácido sulfúrico em meio oxidante; e (d) resíduo a ser lixiviado em ácido nítrico.

2.4.3 Lixiviação com ácido nítrico

O resíduo (não lixiviado) proveniente da lixiviação com peróxido de hidrogênio foi submetido à lixiviação com ácido nítrico 10M. Para tal, foi utilizado uma relação 1:20 (Sólido/Líquido) à temperatura ambiente durante 2 horas. Após a lixiviação, o material em contato com o ácido nítrico foi filtrado e colocado em uma estufa durante 24 horas a 60°C para secagem do mesmo. Por fim, foi realizada a pesagem do não lixiviado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Processamento Físico

Após as duas etapas de cominuição (moinho de facas e moinho de martelos), a porcentagem de perda de massa total no processamento físico foi de 1,16%. O valor de 29% de perda de massa foi obtido em outro trabalho utilizando equipamento similar [18], indicando melhor eficiência no processo de cominuição empregado no presente trabalho. Uma menor perda de massa no processo de cominuição garante a obtenção de uma amostra mais próxima da composição real da PCI. A Tabela 1 apresenta os resultados do ensaio de classificação granulométrica. A quantidade de 29,48% da amostra com granulometria acima de 2 mm pode ser justificada pelo desgaste natural da grelha do moinho de martelos. Pode ser visto, ainda, que aproximadamente 70% da amostra apresenta granulometria menor que 2 mm, o que facilita a caracterização do material, devido a liberação de metais presentes [19].

Tabela 1. Porcentagem da amostra retida em cada peneira

Peneira (mm)	Massa retida (%)
4,00	1,52
2,00	27,96
1,00	27,01
0,50	11,22
0,25	9,56
0,125	6,44
0,075	3,81
0,038	6,89
Fundo	5,68

3.1.1 Digestão em água régia e análise química

A Tabela 2 apresenta os resultados da análise química do licor obtido no ensaio de água régia. Pela análise dos dados, pode ser verificado que 35,5% da massa total da amostra de PCI foi lixiviada, o que representa a fração metálica da amostra. Resultados próximos a este foram encontrados por Kasper [20] e Yamane [18], onde, a caracterização de suas amostras apresentou respectivamente 40% e 45% de metais. Pode ser visto, ainda, que a prata representa 0,045% da massa total da amostra e que o Cu é o metal em maior quantidade na PCI, 19,4%, valor próximo ao encontrado por Yamane [18], 20%, e Park [21], 16%.

3.1.2 Ensaio de perda ao fogo

Através do ensaio de perda ao fogo, foi possível determinar que as placas de circuito impresso são formadas por 25,8% material polimérico; 38,7% material cerâmico e

35,5% de metais. Esses valores se aproximam aos encontrados por Yamane [18], onde foram obtidos valores de 27% material polimérico; 28% material cerâmico e 45% de metais para placas de circuito impresso de computadores. A diferença na quantidade de metais se deve ao fato das placas *lead free* serem mais novas e em sua fabricação, principalmente por fatores econômicos, já se busca a redução no uso de metais.

3.2 Processamento Hidrometalúrgico

Após cada etapa de lixiviação (ácido sulfúrico, ácido sulfúrico em meio oxidante e ácido nítrico), foi realizada análise química do licor obtido para a determinação dos metais presentes. Na Tabela 3, pode ser visto a composição do licor obtido em cada etapa de lixiviação.

3.2.1 Lixiviação ácida

Através de balanço de massa, foi observado que na lixiviação ácida foi extraído 7% de metais em ácido sulfúrico 1M. Foi observado, também, que a prata não foi extraída nesta etapa.

Foi notado que 74,7% de Al, 36,1% de Fe, 6,4% de Ni, 29,5% de Sn e 7,1% de Zn foram extraídos. Além disso, foi observado que o Cu não foi lixiviado nesta etapa, uma vez que este elemento só é lixiviado em ácido forte e em meio oxidante [5].

Tabela 2. Análise química do licor da digestão em água régia

METAL	MASSA (%)
Ag	0,045
Al	2,66
Au	0,002
Cu	19,42
Fe	8,34
Ni	0,27
Sn	1,99
Zn	2,55
Outros (Ba, Ca, Mg, Pb)	0,23
Total	35,5

A lixiviação de Ni e Zn foi de 6,4% e 7,1%, respectivamente. Estes elementos podem formar algum tipo de liga metálica com o cobre dificultando a sua lixiviação individual [22]. Somente quando o cobre for 100% lixiviado, o zinco e níquel também serão.

A lixiviação total de ferro na lixiviação ácida foi de 36,1%. Possivelmente durante a lixiviação em meio oxidante, o ferro provoque um processo de cementação do cobre, impedindo sua extração total nesta etapa de lixiviação [23].

O Sn, como já esperado, deve ter baixa lixiviação em toda a rota hidrometalúrgica, pois os compostos formados durante a lixiviação formam substâncias de estanho parcialmente insolúveis, como o sulfato de estanho.

3.2.2 Lixiviação ácida em meio oxidante

O resíduo proveniente da lixiviação ácida foi imerso em ácido sulfúrico com adição de peróxido de hidrogênio. Nesta etapa, foi solubilizado 21,5% de metais. Dentre os metais solubilizados, foi encontrado uma massa de prata de 0,005 g, o que representou 41% da extração da prata que continha na placa.

A extração de prata nesta etapa pode ter ocorrido devido ao aumento de potencial, ocasionado pela adição de peróxido de hidrogênio [24]. Este aumento no potencial fez com que a prata atingisse a sua faixa de solubilização.

Além da prata, também foram extraídos 17,9% de Al, 62,7% de Cu, 63,9% de Fe, 88% de Ni, 2,1% de Sn e 66,8% de Zn.

Estudos mostram que durante a lixiviação em meio oxidante, o cobre é totalmente lixiviado [5]. Entretanto, foi notado que o ferro não foi totalmente extraído do licor na etapa de lixiviação ácida, o que pode ter interferido no processo de extração do cobre, devido ao processo de cementação [23].

3.2.3 Lixiviação com ácido nítrico

Nesta etapa, observou-se que a lixiviação de prata foi de 55,6%. Foi notado ainda, uma lixiviação de 37,3% do Cu atingindo, assim, 100% de lixiviação. Joda [14] realizou

Tabela 3. Porcentagem em massa de lixiviação de metal para cada etapa de lixiviação

METAL	Etapas			% TOTAL DE EXTRAÇÃO DOS METAIS
	% LIXIVIAÇÃO (H ₂ SO ₄)	% LIXIVIAÇÃO (H ₂ SO ₄) EM MEIO OXIDANTE	% LIXIVIAÇÃO (HNO ₃)	
Ag	0	41	55,6	96,6
Al	74,7	17,9	1,2	93,8
Au	0	0	0	0
Cu	0	62,7	37,3	100
Fe	36,1	63,9	0	100
Ni	6,4	88	5,6	100
Sn	29,5	2,1	2,6	34,2
Zn	7,1	66,8	13,7	87,6
Outros	0,603	0,31	0,17	1,083

lixiviação de metais com ácido nítrico. O autor conseguiu uma lixiviação de cobre de 94,08%. Outros autores [5, 17, 25] também conseguiram valores de lixiviação de cobre da ordem de 99%.

Além da prata, também foi lixiviado cobre (37,3%), níquel (5,6%), estanho (2,6%) e zinco (13,7%).

4 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que as placas de circuito impresso estudadas são compostas de 0,045% de Ag, 2,66% de Al, 0,002% de Au, 19,42% de Cu, 8,34% de Fe, 0,27% de Ni, 1,99% de Sn e 2,55% de Zn. Pode-se verificar que sua composição apresenta 25,8% de material polimérico; 38,7% de material cerâmico e 35,5% de metais. Observou-se também que o

principal constituinte metálico é o cobre (19,42%). Além disso, foi determinado um teor de prata de 0,045%. Dos ensaios de lixiviação, conclui-se que a lixiviação total da prata foi de 96,6%, onde 41% foi lixiviada com ácido sulfúrico em meio oxidante e 55,6% foi extraída na etapa de lixiviação com ácido nítrico. A rota hidrometalúrgica utilizada para a extração de prata a partir de placas de circuito impresso foi: ácido sulfúrico 1M a 75°C por 18 h; seguida de ácido sulfúrico em meio oxidante 1M a 75°C por 6 h; ácido nítrico 10M, em temperatura ambiente por 2 h.

Agradecimentos

Instituto Federal do Espírito Santo – Campus Serra e CAPES.

REFERÊNCIAS

1. Castro M, Saavedra YMB, Ometto AR, Schalch V. Contexto atual e proposta de alternativas para a gestão de resíduos eletroeletrônicos no município de São Carlos-SP. In: III Seminário Internacional Sobre Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos – SIREE. Cidades Sustentáveis e Experiências Inovadoras na Gestão de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos; 2013 Fev; Recife, PE. Recife: Massangana; 2013.
2. Schluep M, Hageluekenb C, Kuehrc R, Magalinic F, Maurerc C, Meskers C, et al. Recycling: from e-waste to resources. Berlin: United Nations Environment Programme, United Nations University; 2009.
3. Bertuol DA, Veit HM, Bernardes AM, Espinosa DCR, Tenório JAS. Resíduos urbanos tecnológicos: desafios e tendências. Revista Metalurgia e Metais. 2005;61(554):167-170.
4. Yamane LH, Espinosa DCR, Tenório JAS. Lixiviação bacteriana de sucata eletrônica: influência dos parâmetros de processo. Tecnológica em Metalurgia, Materiais e Mineração. 2013;10(1):50-56. <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.2013.007>.
5. Moraes VT. Recuperação de metais a partir do processamento mecânico e hidrometalúrgico de placas de circuito impresso de celulares obsoletos [tese de doutorado]. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 2011.
6. Ramesh Babu B, Parande AK, Ahmed Basha C. Electrical and electronic waste: a global environmental problem. Waste Management & Research. 2007;25(4):307-318. <http://dx.doi.org/10.1177/0734242X07076941>. PMID:17874657
7. Luppi TV. Recuperação de prata a partir de radiografias [monografia de especialização]. São Bernardo do Campo: Faculdade SENAI de Tecnologia Ambiental; 2008.
8. Furtado JGC. Estudo de impactos ambientais causados por metais pesados em água do mar na baía de São Marcos: Correlações e Níveis Background [dissertação de mestrado]. João Pessoa: Departamento de Centro de Ciências Exatas de Natureza, Universidade Federal da Paraíba; 2007.
9. Domingues TCG. Teor de metais pesados em solo contaminado com resíduo de sucata metálica, em função de sua acidificação [dissertação de mestrado]. Campinas: Instituto Agrônomo; 2009.
10. Gurung M, Adhikari BB, Kawakita H, Ohto K, Inoue K, Alam S. Recovery of gold and silver from spent mobile phones by means of acidothioureia leaching followed by adsorption using biosorbent prepared from persimmon tannin. Hydrometallurgy. 2013;133:84-93. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.12.003>.
11. Guo J, Rao Q, Xu Z. Application of glass-nonmetals of waste printed circuit boards to produce phenolic moulding compound. Journal of Hazardous Materials. 2008;153(1-2):728-734. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.029>. PMID:17949900

- 12 He W, Li G, Ma X, Wang H, Huang J, Xu M, et al. WEEE recovery strategies and the WEEE treatment status in China. *Journal of Hazardous Materials*. 2006;136(3):502-512. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.04.060>. PMID:16820262
- 13 Li J, Lu H, Guo J, Xu Z, Zhou Y. Recycle technology for recovering resources and products from waste printed circuit boards. *Environmental Science & Technology*. 2007;41(6):1995-2000. <http://dx.doi.org/10.1021/es0618245>. PMID:17410796
- 14 Joda NN, Rashchi F. Recovery of ultra fine grained silver and copper from PC Board scraps. *Separation and Purification Technology*. 2012;92:36-42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2012.03.022>.
- 15 Petter PMH, Veit HM, Bernardes AM. Evaluation of gold and silver leaching from printed circuit board of cellphones. *Waste Management*. 2014;34(2):475-482. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.032>. PMID:24332399
- 16 Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. ABNT NBR 16156: resíduos de equipamentos eletroeletrônicos: requisitos para atividade de manufatura reversa. Rio de Janeiro; 2014.
- 17 Yamane LH. Recuperação de metais de placas de circuito impresso de computadores obsoletos através de processo biohidrometalúrgico [tese de doutorado]. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 2012.
- 18 Yamane LH, Moraes VT, Espinosa DCR, Tenório JAS. Recycling of WEEE: characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers. *Waste Management*. 2011;31(12):2553-2558. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2011.07.006>. PMID:21820883
- 19 Murugan RV, Bharat S, Deshpande AP, Varughese S, Haridoss P. Milling and separation of the multi-component printed circuit board materials and the analysis of elutriation based on a single particle model. *Powder Technology*. 2008;183(2):169-176. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2007.07.020>.
- 20 Kasper AC, Berselli GBT, Freitas BD, Tenório JAS, Bernardes AM, Veit HM. Printed wiring boards for mobile phones: characterization and recycling of copper. *Waste Management*. 2011;31(12):2536-2545. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2011.08.013>. PMID:21906927
- 21 Park YJ, Fray DJ. Recovery of high purity precious metals from printed circuit boards. Reino Unido: Elsevier; 2008.
- 22 Cepriá G, Aranda C, Arantegui JP, Lacueva F, Castillo JR. Voltammetry of immobilised microparticles: a powerful analytical technique to study the physical and chemical composition of brass. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2001;513(1):52-58. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-0728\(01\)00599-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-0728(01)00599-X).
- 23 Jackson E. Hydrometallurgical extraction and reclamation. New York: Ellis Hoorwood; 1986.
- 24 Pourbaix M. Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions. New York: Pergamon Press; 1966.
- 25 Silvas FPC. Utilização de hidrometalurgia e biohidrometalurgia para reciclagem de placas de circuito impresso [tese de doutorado]. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 2014.

Recebido em: 4 Dez. 2014

Aceito em: 3 Fev. 2015