

**Avaliação do processo de extração do cobre contido em placas de circuito impresso via hidrometalúrgia e recuperação por oxirredução****Evaluation of the copper extraction process in hydrometallurgy printed circuit boards and oxirreduction recovery**

DOI:10.34117/bjdv5n8-026

Recebimento dos originais: 26/07/2019

Aceitação para publicação: 16/08/2019

**Alexandre Candido Soares**

Graduado em Engenharia Química pela Universidade Federal do Espírito Santo

Instituição: Universidade Federal do Espírito Santo

Endereço: Rua Dr. José Vieira Tatagiba, Nº 104, ap 102 – Guararema, Alegre – ES, Brasil.

E-mail: alexandre.csouares@hotmail.com

**Yara Daniel Ribeiro**

Graduada em Engenharia Química pela Universidade Federal do Espírito Santo

Instituição: Universidade Federal do Espírito Santo

Endereço: Rua Dr. José Vieira Tatagiba, Nº 104, ap 102 – Guararema, Alegre – ES, Brasil.

E-mail: yaradanielr@hotmail.com

**RESUMO**

O acentuado crescimento do setor industrial eletrônico ocasiona, ao mesmo passo, o crescimento dos resíduos de equipamentos eletrônicos, tanto resíduos industriais, quanto os domésticos como, por exemplo, o descarte de equipamentos obsoletos. Em todos equipamentos eletrônicos o cobre está presente, sendo um metal de elevada procura, visto que é utilizado em diversos segmentos da tecnologia. Esses resíduos eletrônicos por sua vez podem ser reciclados e o cobre neles contidos, recuperado, possibilitando redução no impacto ambiental gerado pelo seu descarte inadequado, além de promover economia na exploração das reservas naturais. Dentro desse contexto, o presente trabalho, avaliou a recuperação do cobre de placas de circuito impresso de equipamentos eletrônicos por meio de processos físicos e químicos, em que o tamanho das placas foi reduzido e o cobre concentrado, em seguida, realizada a lixiviação em meio ácido, utilizando ácido nítrico diluído, tendo como resultado a lixiviação acima de 75% do cobre contido nas placas. Esse metal solubilizado foi recuperado com técnica de oxirredução, utilizando ferro metálico, possibilitando a recuperação acima de 90% do cobre em solução. Para quantificar o cobre em solução e o recuperado, foi utilizada a técnica de espectrofotometria de absorção atômica mostrando que a recuperação utilizando esse processo.

**Palavras chaves:** placas de circuito impresso, cobre, lixiviação.**ABSTRACT**

The sharp growth of the electronic industrial sector causes, at the same time, the growth of electronic equipment waste, both industrial and domestic waste, such as the disposal of obsolete equipment. In all electronic equipment copper is present, being a metal of high

demand, as it is used in various segments of technology. These electronic wastes can in turn be recycled and the copper contained in them, recovered, allowing reduction in the environmental impact generated by its improper disposal, besides promoting economy in the exploitation of the natural reserves. Within this context, the present work evaluated the recovery of electronic equipment printed circuit board copper through physical and chemical processes, in which the size of the boards was reduced and the concentrated copper was then leached in medium acid, using dilute nitric acid, resulting in leaching above 75% of the copper contained in the plates. This solubilized metal was recovered by oxirreduction technique, using metallic iron, allowing the recovery of over 90% of the copper in solution. To quantify the copper in solution and the recovered one, the atomic absorption spectrophotometry technique was used showing the recovery using this process.

**Keywords:** printed circuit boards, copper, leaching.

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, os setores industriais que mais crescem em todo o mundo, devido à rápida evolução tecnológica e a expansão do mercado mundial, são as empresas fabricantes de materiais eletrônicos. Acompanhando essa crescente evolução, a quantidade de lixo eletrônico, conhecido também como resíduo eletroeletrônico, descartado de maneira irregular ou sem o devido tratamento de reaproveitamento adequado chegou a 44,7 milhões de toneladas no ano de 2016, e com previsões para que nos próximos anos esse número ultrapasse a casa de 50 milhões de toneladas. O Brasil foi o segundo país que mais gerou resíduo eletrônico, produzindo cerca de 1,5 milhões de toneladas, atrás apenas dos Estados Unidos (Baldé *et al.*, 2017).

Através de um tratamento adequado, esses resíduos eletroeletrônicos podem ser reaproveitados, isso porque os equipamentos eletrônicos são normalmente compostos por uma carcaça metálica ou plástica, cabos elétricos e placas de circuito impresso (PCI), os quais são em sua maioria recicláveis (Mattos, 2008; Willian e Willians, 2007).

As placas de circuito impresso são um dos principais componentes dos equipamentos eletroeletrônicos, podendo compor mais de 25% da massa de todos os produtos fabricados. Sua composição é extremamente heterogênea, contendo uma série de metais (Cu, Ni, Sn, Pb e metais nobres), de alto valor agregado, além de materiais poliméricos e cerâmicos (Yellishetty *et al.* 2011; Tenório, 2012; Tomasek *et al.*, 2000; Veit *et al.*, 2000).

No caso do cobre, estudos mostram que a quantidade de cobre contida nas PCI's pode chegar até 30% da sua composição (Veit, 2005; Moraes, 2011). Percentual esse significativo quando comparado com a exploração nas fontes naturais, representada por apenas 3% de metal (Veit, 2005). Uma matemática simples, considerando uma tonelada de minério, de fontes

primárias retira-se até 30 quilos de cobre, enquanto que por outro lado, tomando a mesma base de cálculo (1 ton) em PCI esse valor pode chegar até 300 quilos.

Dentre as diversas técnicas de recuperação do cobre das PCI's, o processo de hidrometalurgia (lixiviação) utilizando ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), que segundo trabalhos analisados, apresentou resultados satisfatórios para a recuperação do cobre (Moraes 2011; Oliveira, 2012).

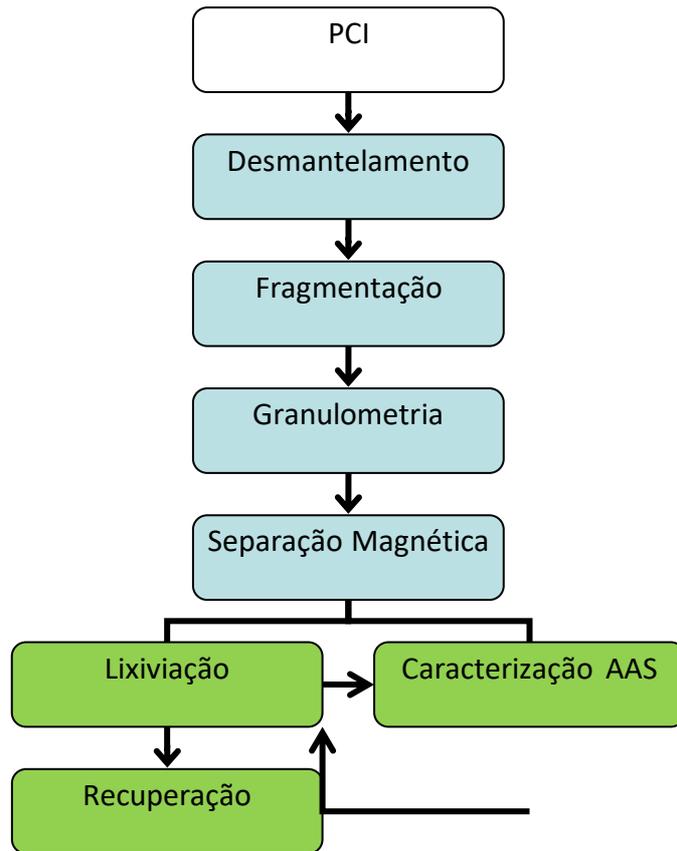
Após a etapa de lixiviação usando o ácido nítrico, a recuperação do cobre solubilizado pode ser feita pelo processo de oxirredução, conhecido também como cementação. Essa técnica consiste em utilizar metal, em sua forma metálica (reduzida) e com menor potencial de redução em relação ao outro metal solubilizado, para precipitar o segundo metal que está em solução na sua forma iônica. Esse processo ocorre, pois quando entram em contato, o metal com menor potencial de redução transfere seus elétrons naturalmente para o metal em solução, que por sua vez, tem seu potencial maior, fazendo com que o mesmo precipite em sua forma metálica (Jackson, 1986).

Diante do que foi apresentado, verifica-se a importância de estudar o processo de extração dos metais contidos nas placas de circuito impresso, tanto por razões de natureza ambiental e de conservação de recursos quanto devido ao valor econômico dos metais de base e preciosos nelas contidos. Desta forma, propõe-se avaliar o processo de extração do cobre nas PCI via hidrometalurgia com ácido nítrico, o qual será recuperado por oxirredução com ferro metálico. Todas as análises quantitativas do cobre serão conduzidas pela técnica de espectrometria de absorção atômica com chama.

## **2. METODOLOGIA**

As etapas da metodologia estão representadas no fluxograma como mostrado na Figura 1, sendo que as células de azul representam as etapas físicas e as verdes as químicas do processo.

Figura 1: Fluxograma genérico do processo.



Fonte: Autor.

## 2.1 DESMANTELAMENTO E FRAGMENTAÇÃO DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

Nesse trabalho foram utilizadas 4 placas de circuito impresso do tipo *motherboard* de computadores de diferentes marcas, modelos e ano de fabricação, com o intuito de obter variação de composição. As PCI's passaram por um processo de limpeza e os dissipadores de calor foram retirados. Após isso, foram desmanteladas, ou seja, todos os componentes soldados/colados na superfície foram retirados, utilizando um soprador térmico. Em seguida, estas placas foram fragmentadas em partes menores que 2 cm e levadas para um moinho de faca, modelo SL32, Solab, a fim de obter partículas menores de 1 mm. Após a fragmentação, as PCI's foram peneiradas utilizando peneira de 1 mm de abertura (16 TYLER/MESH). A fração retida na malha da peneira passou por mais um estágio de fragmentação até todo material estivesse com granulometria inferior a 1 mm. O processo de moagem das placas fragmentadas foi realizado no Departamento de Engenharia Química da Unifei – Itajubá/MG.

## 2.2 SEPARAÇÃO MAGNÉTICA

Com a placa de circuito impresso fragmentada, proveniente da fragmentação (< 1 mm), foi realizada a separação magnética passando todo material por um tubo metálico medindo 1 metro de comprimento com campo magnético. A vazão do material ficou fixada em 60 g/min e a separação foi realizada em triplicata com a finalidade de garantir a retirada de todo material magnético da amostra. Essa etapa foi realizada no Laboratório da Engenharia Química do Campus de Alegre.

## 2.3 CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

Após os tratamentos mecânicos, foram realizados ensaios de caracterização para as frações não magnéticas.

Para a caracterização foi usado o método de digestão em água régia, a fim de solubilizar todo o cobre e quantificá-lo pela técnica de Espectrometria de Absorção Atômica com Chama (AAS), no Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas, no Centro de Ciências Agrárias e Engenharia, no Campus Alegre da Universidade Federal do Espírito Santo.

A água régia (proporção de 3:1 de HCl : HNO<sub>3</sub>) foi adicionada ao material proveniente do tratamento mecânico na proporção de 1g para 20 mL de água régia. Nessa etapa 10g de material foram colocados em contato direto com 200 mL de solução. A digestão em água régia foi feita em temperatura ambiente durante 24 h e realizada em triplicata.

Após este período, o resíduo sólido foi separado do lixiviado por filtração simples.

Foram coletadas amostras de 2 mL das soluções lixiviadas em seguida diluídas até 1 litro usando um balão volumétrico para análise da quantidade de cobre utilizando técnica de Espectrometria de Absorção Atômica com Chama.

## 2.4 PROCESSAMENTO HIDROMETALÚRGICO

O ensaio de lixiviação foi realizado em triplicata. Para isso, foram pesadas amostras de 10 g de PCI, em seguida, misturadas com 200 mL de solução (relação 1 para 20 de sólido e líquido), utilizando ácido nítrico 2 mol.L<sup>-1</sup> a uma temperatura de 60 °C, como descrito na literatura (Moraes, 2011; Oliveira 2012).

Para a reação foi utilizado um agitador magnético com aquecimento, por um período de 4 horas em balão de fundo chato de 500 mL com um condensador de bolas de 300 mm para refluxo dos vapores ácidos produzidos.

Ao termino do período de lixiviação o subproduto sólido foi separado do líquido utilizando papel de filtro quantitativo por filtração a vácuo.

## 2.5 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO LIXIVIADO

Para a caracterização do lixiviado, foram coletadas alíquotas de 2 mL e diluídas até 1L. Em seguida o cobre solubilizado foi quantificado por meio da técnica de Espectrometria de Absorção Atômica com Chama.

## 2.6 RECUPERAÇÃO DO COBRE POR CEMENTAÇÃO

Após a quantificação de cobre na solução, realizada no processo anterior, foi usado ferro metálico no processo de cementação do cobre. Para definir a quantidade de ferro necessário, foi usada como base a reação de oxirredução de ferro e cobre como mostrado na Equação Química (1). A quantidade de ferro foi usada em excesso, garantindo precipitar a maior quantidade de cobre possível.



O ferro metálico foi misturado a 100 mL das soluções em temperatura ambiente (25 °C) sob agitação magnética por 24 horas. Após esse período, utilizando filtração a vácuo e papel de filtro quantitativo, foi separado o líquido do sólido.

## 2.7 QUANTIFICAÇÃO DE COBRE PRECIPITADO

Foram coletadas amostras de 2 mL das soluções após a cementação para análise da quantidade de cobre restante na solução utilizando Espectrometria de Absorção Atômica com Chama. A quantidade de cobre precipitada foi calculada pela diferença entre a quantidade total que havia inicialmente na solução e a quantidade de cobre restante no lixiviado.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 PROCESSAMENTO MECÂNICO

O cobre presente nas placas normalmente está encapsulado por uma camada de polímero ou cerâmica. A granulometria inferior a 1 mm garante que todo o cobre presente nas PCI's esteja expostos ao ataque químico, pois o ácido requer contato direto com o cobre para ocorrer a lixiviação. (Moraes, 2011).

Foram pesadas 900 gramas de PCI's antes da fragmentação. Após essa etapa o obteve-se 889,25 gramas de placa triturada, uma perda de aproximadamente 10,75 g sendo 1,2% do

total. Provavelmente perdas por material suspenso no funcionamento do equipamento devido a sua baixa granulometria. Todo material ficou classificado com menor que 1 mm, pois passou por completo na peneira de 16 MESH.

### 3.2 SEPARAÇÃO MAGNÉTICA

O material seguiu para o tubo magnético, passando por 3 vezes nessa etapa, a uma vazão de 60 g/min. Inicialmente o peso era de 889,25 gramas de PCI's. Após o processo, o material separado foi de 24,89 g, nomeada de fração magnética, restando 864,35 gramas, nomeada de fração não magnética.

A fração magnética representou 2,79% das PCI's. Mesmo sendo pequena a porcentagem, poder ser considerado um importante resultado, pois esse material separado é rico em ferro e níquel, sendo eles elementos muito magnéticos e que compõe grande parte das PCI's.

A fração não magnética foi o alvo das etapas subsequentes, pois concentra os materiais não magnéticos, que inclui o cobre.

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

Após as 24 horas à temperatura ambiente, as 3 amostras de 10 g foram analisadas a fim de quantificar o cobre presentes nas soluções, utilizando a técnica de AAS. Os resultados das concentrações de cobre são apresentados na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1: Quantidade de cobre nas PCI's.

<b>Amostras</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Concentração de cobre (g.L <sup>-1</sup> )	10,91	12,08	11,01
Porcentagem do cobre (%)	21,83	24,16	22,01

Fonte: Autor.

Como pode-se observar, a concentração média de cobre na solução foi de 11,33 g.L<sup>-1</sup>. Com isso, a porcentagem desse metal nas placas de circuito impresso analisadas, em média, foi de 22,67 %.

Comparando com os trabalhos de Veit (2005) e Yamane (2012), que encontraram a porcentagem de cobre nas placas de circuito impresso, respectivamente, de 21,19 e 23,88%, os resultados obtidos foram satisfatórios.

Observa-se também que houve pouca variação na concentração de cobre nas amostras estudadas, demonstrando que esses resultados podem ser considerados reprodutíveis.

### 3.4 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO LIXIVIADO

Após os processos hidrometalúrgicos, foram diluídos 2 mL do lixiviado até 1L de cada amostra, em seguida, levado até o laboratório para análise dos lixiviados pela técnica de Espectrometria de Absorção Atômica com Chama (AAS), os resultados estão apresentados na Tabela 2, a lixiviação é em função da quantidade na caracterização.

Tabela 2: Concentrações nas PCI's.

<b>Amostras</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Concentração de cobre (g.L <sup>-1</sup> )	8,52	9,18	8,41
Lixiviação (%)	75,19	81,02	74,22

Fonte: Autor.

Como observado, a concentração média extraída pelos ensaios foi de 8,70 g.L<sup>-1</sup> e com lixiviação média de 76,81 %.

### 3.5 RECUPERAÇÃO DO COBRE POR CEMENTAÇÃO

Considerando a estequiometria da reação de oxirredução para a concentração média de 8,7 g.L<sup>-1</sup> na solução, são necessários 7,65 g de ferro, com o proposito de total recuperação, foi usado 10 g de ferro.

Ao final das 24 horas, o sólido foi reparado da solução por filtragem a vácuo usando papel qualitativo e usados 10 mL de água deionizada para lavar o filtrado.

### 3.6 QUANTIFICAÇÃO DE COBRE PRECIPITADO

Após passado o tempo estipulado na cementação, o cobre precipitado misturado com o ferro restante foi filtrado com papel quantitativo. Em seguida, foram coletados 2 mL da solução restante e diluídos até 1 L, então foi analisado as quantidades de cobre restante nas

soluções, por Espectrometria de Absorção Atômica com Chama, foi repetido para todos os ensaios. Os resultados e porcentagens de recuperação estão apresentados na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3: Quantidade de cobre restante e percentual de recuperação.

<b>Amostras</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
Concentração de cobre (g.L <sup>-1</sup> )	0,66	0,87	0,60
Recuperação (%)	93,95	92,79	94,55

Fonte: Autor.

Como observado, a recuperação por cementação usando ferro ficou acima de 92 %. Levando em consideração o preço do ferro em relação ao cobre, se mostra vantajoso o processo.

#### **4. CONCLUSÃO**

O processamento mecânico das placas de circuito impresso se mostrou eficiente na diminuição da granulometria para partículas menores que 1 mm e em relação a perda de material pelo moinho, ficando menor que 1,2%. No caso da separação magnética, a porcentagem separada representou uma pequena parte, somando quase 2,8%, porém nessa fração se concentra os metais magnéticos, sendo de interesse para outros processos.

Em relação à lixiviação do cobre, utilizando ácido nítrico diluído, ficou acima de 75% em todos os ensaios, mostrando a eficácia desse lixiviante. Por ser diluído, se tem uma economia de reagente, um ponto importante no processo.

A recuperação por cementação utilizando ferro metálico se mostrou muito eficiente, considerando que a recuperação do cobre ficou acima dos 92% em todas as replicas.

As análises conduzidas por meio da técnica de Espectrometria de Absorção Atômica com Chama se mostraram eficientes para analisar o cobre, considerando que as quantidades tiveram baixa variação e a caracterização das placas ficou próxima a de outros autores.

Como a variação das concentrações em de um ensaio para o outro foi baixa, mostra que o processo pode ser replicado.

**REFERÊNCIAS**

- BALDÉ, C.P., FORTI V., GRAY, V., KUEHR, R., STEGMANN,P.: “The Global E-waste Monitor – 2017”, United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna.
- JACKSON, E.. Hydrometallurgical extraction and reclamation. Ellis Horwood Limited, New York, p. 29-39, 1986.
- MATTOS, Karen Maria da Costa. Os impactos ambientais causados pelo lixo eletrônico e o uso da logística reversa para minimizar os efeitos causados ao meio ambiente. Rio de Janeiro, RJ. pp. 5-7, 2008.
- MELO, R. A. C. de - Estudo da lixiviação de placas de circuito impresso de computadores desktops obsoletos da UFRN. Dissertação de Mestrado, UFRN, PPGEQ, Área de Concentração: Engenharia Química, Natal, Brasil, 2017.
- MORAES, V. T. Recuperação de metais a partir do processamento mecânico e hidrometalúrgico de placas de circuito impresso de celulares obsoletos. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- OLIVEIRA, Paula Cristina Filipe de. Valorização de Placas de Circuito Impresso por Hidrometalurgia. 2012. 320 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia do Ambiente, Universidade Técnica de Lisboa Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2012.
- TENÓRIO, J. A. S. Production of non ferrous metallic concentrates from electronic scrap. Minerals, metals and materials society/AIME (USA). p. 505-509, 1997.
- TOMASEK, K., VADASZ, P. e RABATIN, L. “Gold extration from the electronical scrap”. Slovak Republic. v. 6, n. 2, p. 116-124, 2000.
- VEIT, H. M., PEREIRA, C. D. e BERNARDES, A.M. “Using mechanical processing in recycling a printed wiring boards”. JOM. v. 54, n. 6, p. 45-47. 2002.
- VEIT, H. M. Reciclagem de cobre de sucatas de placas de circuito impresso. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- YAMANE, L. H. Recuperação de metais de placas de circuito impresso de computadores obsoletos através de processo biohidrometalúrgico. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- YELLISHETTY, M.; MUDD, G. M.; RANJITH, P. G.; THARUMARAJAH, A.; Environ. Sci. Policy 2011, 14, 650. GERBASE, A. E.; OLIVEIRA, C. R.; Quim. Nova 2012, 35, 1486.

WILLIAM, J. H. e WILLIAMS, P.T. Separation and recovery of materials from scrap printed circuit boards. *Resources Conservation and Recycling*. v. 51, p. 691-709, 2007.