

III-016 - CARACTERIZAÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO DE TABLETS OBSOLETOS PARA FINS DE RECICLAGEM

Izabella Vicentim Moreira

Cientista Ambiental (USP). Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável (PPGES/UFES).

Luciana Harue Yamane

Bióloga (UFES). Mestre em Engenharia Ambiental (PPGEA/UFES). Doutora em Engenharia Metalúrgica (UFES).

Larisse Suzy Silva de Oliveira

Engenheira Sanitarista e Ambiental (IFES/ES). Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável (PPGES/UFES).

Renato Ribeiro Siman ⁽¹⁾

Engenheiro Químico (UFRRJ). Mestrado e Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento (EESC/USP). Professor dos Mestrados Acadêmico Engenharia Ambiental (PPGEA) e Profissional em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável (PPGES) do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo.

Renaro Meira Dutra

Engenheiro Ambiental (UFES). Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável (PPGES/UFES).

Endereço⁽¹⁾: Avenida Fernando Ferrari, 514 – Goiabeiras – Vitória – ES - CEP: 29.075-910 - Brasil - Tel: (27) 3335-2168- e-mail: renato.siman@ufes.br

RESUMO

Placas de circuito impresso contém metais de interesse industrial, como cobre, prata, ouro e platina, entre outros. O consumo de equipamentos eletroeletrônicos atingiu 12.726 bilhões de unidades em 2015, aumentando assim a geração de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) que contém as placas e circuito impresso (PCI), como computadores, celulares e *tablets*. Este último é considerado um REEE de geração recente, e novos trabalhos são necessários para identificar os materiais que as compõem. A presente pesquisa se propôs a caracterizar PCI de *tablets*, a fim de identificar os materiais que as compõem, possibilitando uma avaliação quanto à possibilidade de recuperação de metais destes REEE. O material foi submetido ao processamento mecânico, seguido de lixiviação em água régia por 24h. Filtrou-se a solução e o material retido em papel de filtro seguiu para ensaio de perda ao fogo (800°C; 1h). Por meio de balanço de massa, obteve-se a massa das frações metálicas, cerâmicas e poliméricas. A leitura da lixívia em ICP MS permitiu verificar a composição da fração metálica, identificando os metais e quantificando-os. Observou-se que a composição das PCI de *tablets* obtidas (35% metais; 33% cerâmicos e 32% polímeros) é similar à apresentada em literatura para outros tipos de REEE, como computadores. A fração metálica mostrou-se composta principalmente por Cu, Sn, Ni, Zn, Pb, Mn, Ag, Sr, Au, Pt, Al e Fe em concentrações similares a de outros REEE, o que mostra seu potencial para reciclagem e recuperação de metais.

PALAVRAS-CHAVE: *Tablets*, Placa de circuito impresso, Resíduo de equipamento eletroeletrônico, Recuperação de metais

INTRODUÇÃO

Os *tablets* figuram entre os equipamentos eletroeletrônicos mais vendidos do mundo, ultrapassando a venda de computadores no Brasil em 2013. Tal crescimento está diretamente ligado ao aumento na geração de resíduo de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), sendo que são gerados mais de 40 milhões de toneladas por ano no mundo. A obsolescência programada e o desenvolvimento de novas tecnologias influenciam este processo (GUAN *et al.*, 2012; HONDA; KHETRIAL; KUEHR, 2016; ABDI, 2017).

Nos REEE são encontrados materiais poliméricos, cerâmicos e metálicos. Dentre os metais encontrados estão cobre, prata, ouro, platina, entre outros. Assim, é interesse economicamente a recuperação dos mesmos. Além disso, há o interesse ambiental ligado à menor demanda de resíduos sólidos a serem enviados para aterro sanitário. A retirada de metais tóxicos como cádmio e chumbo, potencialmente poluidores do meio, e a diminuição da demanda de exploração mineral para produção metalúrgica, preservando o meio natural,

principalmente de metais escassos, como o cobalto e o paládio também motivam o tratamento de tais resíduos sólidos (CUCCHIELLA *et al.*, 2015; KUMAR, HOLUSZKO, ESPINOSA, 2017).

Cucchiella *et al.* (2015) calcularam o valor que pode ser recuperado por quilo de REEE reciclado, e mostraram que celulares, *tablets* e *notebooks* são os REEE mais rentáveis para a reciclagem, 30USD.kg⁻¹, 4,95USD.kg⁻¹ e 3,54USD.kg⁻¹ respectivamente, considerando a concentração e o valor de mercado de metais preciosos e/ou raros, e o consumo desses equipamentos eletroeletrônicos.

Todos EEE contêm placa de circuito impresso (PCI: peça base na qual são montados os circuitos eletrônicos), e, com os avanços tecnológicos a concentração de metais nestas placas tem se tornado cada vez mais heterogênea, e seus componentes compactos, dificultando os processos de reciclagem. Tais peças contêm a maior quantidade de metais, cerca de 40% do total, sendo a principal parte de interesse para a recuperação de metais devido à presença de metais preciosos (LADOU, 2006; CUCCHIELLA *et al.*, 2015; GOSH *et al.*, 2015; KUMAR, HOLUSZKO, ESPINOSA, 2017).

A PCI é a base na qual microcomponentes, que definem a função do EEE, são interconectados. O arranjo de seus componentes depende do objetivo da estrutura projetada. Entretanto, alguns componentes são comuns à maior parte delas, como os capacitores, resistores, indutores, baterias, dentre outros (MARQUES; CABRERA; MALFATTI, 2013).

Em geral, as PCI são compostas por 30% de material plástico, 30% de material cerâmico (sílica, mica, alumina, titânio de bário) e 40% de metal (HE *et al.*, 2006). Estudos reportando a composição metálica das PCI de diferentes tipos de resíduos de equipamento eletroeletrônico estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1- Concentração de metais (mg.g⁻¹) em PCIs de diferentes resíduos de equipamentos eletroeletrônicos

Metais	Desktop	Notebook	Celular
Alumínio	18	18	15
Cobalto	0,048	0,08	6,3
Cobre	200	190	330
Ouro	0,24	0,63	1,5
Chumbo	23	9,8	13
Níquel	2,7	5,7	11,5
Prata	0,57	1,1	3,8
Ferro	13	37,0	18
Zinco	2,7	16	5,0
Estrôncio	18	16	35
Paládio	0,15	0,2	0,3
Bário	1,9	5,6	19,0
Tântalo	0,007	5,8	2,6

Fontes: Adaptado de Oguchi *et al.* (2011); Cucchiella *et al.* (2015); Isildar *et al.* (2016).

Conforme apresentado na Tabela 1, observa-se que a concentração de metais varia devido à diferente composição das PCI dos REEE. Isso pode ser explicado pelo uso de componentes dispositivos montados em superfície (SMD) que exigem o uso de substâncias nobres e com elevado nível de eficiência para possibilitar o funcionamento de equipamentos menores (CUCCHIELLA *et al.*, 2015).

Além disso, pelo desenvolvimento de PCI mais compactas, a concentração de metal por quilograma destes dispositivos tende a ser maior. Por exemplo, ouro, prata, níquel, cobalto, cobre, estrôncio e bário são encontrados em maior concentração em PCI de celular do que de computadores *desktop* (ISILDAR *et al.*, 2015). Esta compactação dificulta a recuperação dos metais com elevado nível de pureza, muitas vezes exigido para a reutilização destes na indústria (GOSH *et al.*, 2015).

A concentração de metal encontrada no minério é, por vezes, menor do que a encontrada em uma fonte secundária, sendo até dez vezes maior em PCI (YAMANE, 2012; KUMAR, HOLUSZKO, ESPINOSA, 2017). Como exemplo, o cobre pode representar até 3% do minério e chega a representar até 21% da massa das PCI, representando assim uma alternativa viável de fonte secundária de metais, além de evitar que as reservas naturais dos metais sejam intensivamente exploradas (VEIT, 2001; CUI, FORSSBERG, 2003; KUMAR, HOLUSZKO, ESPINOSA, 2017).

O objetivo deste trabalho foi caracterizar placas de circuito impresso de *tablets* a fim de identificar os materiais que as compõem, comparando-os com outros REEE.

MATERIAIS E MÉTODOS

PROCESSAMENTO MECÂNICO

O processamento mecânico das PCI de *tablets* ocorreu no Laboratório de Ensaio em Materiais de Construção (Lemac) da Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes). Previamente, as PCI obtidas foram submetidas ao corte em guilhotina manual, resultando em frações de aproximadamente 1cm², com o objetivo de adequar o tamanho à abertura do moinho.

Para que fossem trituradas, adicionou-se cerca de 40g de PCI fracionadas no moinho de pratos vibratórios por ciclo de funcionamento (60s). Após esse procedimento o material obtido foi classificado pelo tamanho das partículas em peneiras de abertura 1,2mm (Granustest) até que a fração triturada fosse depositada na base do conjunto de peneiras. O material retido na peneira (maior granulometria) foi novamente submetido à cominuição em moinho de pratos vibratórios. Posteriormente o material foi quarteado em amostras de aproximadamente 3g.

LIXIVIAÇÃO EM ÁGUA-RÉGIA

O ensaio teve por objetivo a digestão dos metais presentes nas amostras de PCI cominuída, e ocorreu em triplicata no Laboratório de Caracterização Ambiental de Resíduos (Lacar) da Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes). Para o preparo da água-régia foram misturados os ácidos nítrico e clorídrico previamente destilados (Bergho/Distillacid BSB-939-IR) na proporção 1:3.

Essa mistura foi adicionada à amostra de 3g de PCI, na proporção 1:20 (totalizando 60mL), sendo imediatamente coberto com vidro relógio a fim de evitar a perda de solução por evaporação. A solução foi agitada manualmente para que a amostra ficasse totalmente exposta ao agente lixiviante, e reagiu por 24h (PARK, FRAY, 2009).

Após o tempo de reação, a solução foi filtrada em papel filtro de porosidade 125mm. O papel de filtro foi lavado com água ultrapura, posicionado em um cadinho cerâmico e seco em estufa (Logen Scientific), a 70°C por um período de 48h. Após o tempo de secagem, o papel com o material insolúvel retido foi mantido por 2h em dessecador e teve seu peso aferido em balança analítica (Quimis/Q-500L210C), e então seguiu para ensaio de perda ao fogo.

A lixívia foi avolumada em balão volumétrico de 250mL e homogeneizada, alíquotas de 15mL foram retiradas e armazenadas em tubos Falcon para posterior quantificação dos metais no espectrômetro de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP MS). Foram analisados os seguintes metais: Cu, Al, Fe, Ni, Sn, Mn, Pb, Zn, Au, Ag, Pt, Sr.

ENSAIOS DE PERDA AO FOGO

Para a determinação das frações polimérica (orgânica) e cerâmica (não-orgânica) realizou-se o ensaio de perda ao fogo. Colocou-se os cadinhos com o papel filtro, utilizados no ensaio de lixiviação, em mufla (Elektro/Linn Elektro Therm) a 800°C por uma hora. Após esse período o material foi retirado e colocado em dessecador por quatro horas, e o peso foi aferido em balança analítica. Assim, calculou-se o balanço de massa seguindo as Equações 1 e 2:

$$M = M_i - C - P \quad (1)$$

$$C = M_{ff} - M_{fi} \quad (2)$$

Onde, M: massa fração metálica (mg); M_i: massa inicial amostra (mg); C: massa fração cerâmica (mg); P: massa fração polimérica (mg); M_{fi}: massa amostra retida no papel de filtro (mg); M_{ff}: massa amostra após perda ao fogo (mg).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fim de obter a liberação dos materiais contidos nas PCI para posterior caracterização e biolixiviação de metais, procedeu-se com a cominuição das PCI obtidas, partindo de uma massa inicial de 1397,02g (Figura 1).

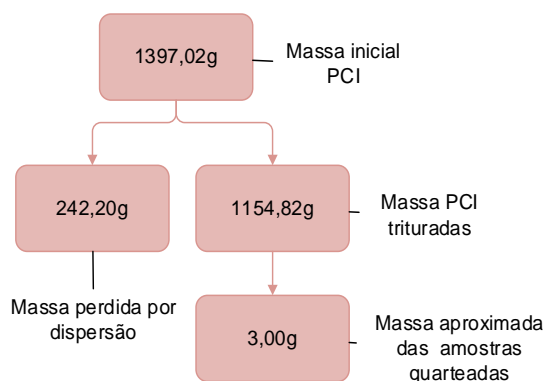


Figura 1: Massa das placas de circuito impresso de *tablets* obtidos.

Neste processo houve perda de aproximadamente 18% do material (Figura 1) por dispersão do pó, fração menor do que a estimada em literatura (40% do material cominuído) (JIANG *et al.*, 2012; KUMAR, HOLUSZKO, ESPINOSA, 2017).

A composição das placas de circuito impresso pôde ser definida após o processo de caracterização por digestão de metais em água-régia. Durante o processo houve a formação de gás de coloração marrom, possivelmente dióxido de nitrogênio, e sua perda foi evitada com o uso do vidro-relógio (MOTTA, 2018).

Através de balanço de massa pôde-se concluir os dados apresentados na Figura 2.

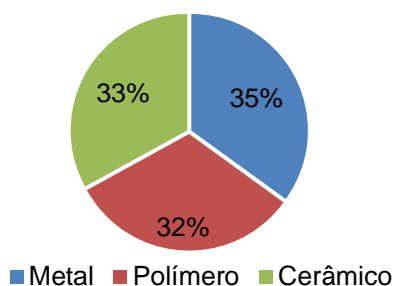


Figura 2: Composição do material cominuído de Placas de Circuito Impresso de *tablets* (% massa)

Os valores obtidos (Figura 2) nesta pesquisa denotam similaridade com os encontrados por Motta (2018) ao caracterizar PCI de *tablets*, 36% metais, 33% cerâmicos e 31% polímeros. Veit (2001), ao caracterizar PCI de computadores, e Park e Fray (2009), ao estudarem a digestão de metais de PCI por água-régia, observaram que 35% da PCI correspondiam à fração metálica, sem diferenciar as outras frações (cerâmicos e polímeros).

Outros estudos descrevem a fração metálica como sendo 40% da massa de PCI, e as frações polímeras e cerâmicas como 30% cada. No entanto, tais estudos descrevem tipos diferentes de REEE, o que pode explicar tal diferença de composição (GOSH *et al.*, 2015; KUMAR, HOLUSZKO, ESPINOSA, 2017).

A composição da fração metálica foi obtida após análise da lixívia em ICP MS, sendo quantificados os metais identificados, conforme a Tabela 2.

Tabela 2: Caracterização da fração metálica de placas de circuito impresso de *tablets*

Metais	Concentração (% em massa)	Média (mg.L ⁻¹)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação
Cu	19,06	613,63	14,14	0,02
Ni	1,17	37,72	3,07	0,08
Sn	4,47	143,86	16,58	0,12
Pb	0,26	8,30	1,46	0,18
Zn	0,68	21,80	3,18	0,15
Ag	0,13	4,05	0,42	0,10
Mn	0,19	6,07	1,45	0,24
Au	0,11	3,61	0,54	0,15
Pt	0,001	0,04	0,01	0,14
Sr	0,12	3,81	0,40	0,10
Outros metais	6,77	217,82	6,91-	0,032

Os metais ferro e alumínio (Tabela 2) não puderam ser quantificados por interferência da concentração de outros metais nas amostras analisadas em ICP MS. O cobre foi o metal encontrado em maior concentração nas PCI de *tablet* (19,06% em massa). Este é o principal metal utilizado na fabricação de PCI por suas características de boa condutividade e resistência, além da possibilidade de produção de folhas finas, fundamental para o desenvolvimento de PCI cada vez menores (MEHL, 2017).

Já o estanho, segundo metal de maior concentração encontrado na amostra caracterizada (4,47% em massa), é utilizado em ligas e soldas nas PCI de *tablet* devido à adesão a superfícies (RUBIN, 2014).

Para os metais chumbo, manganês e ouro, o coeficiente de variação indica uma maior heterogeneidade das amostras em relação a estes metais (Tabela 2). Isto pode ter ocorrido pela dificuldade em homogeneizar amostras sólidas. Além disso, foram realizadas apenas três repetições, o que tornam as medidas de dispersão mais sensível às variações.

Na Tabela 3 as concentrações averiguadas são comparadas com as de outros estudos.

Tabela 3: Comparação da concentração (% massa) de metais em placas de circuito impresso

Metais	Resultados obtidos	Motta (2018) ¹	Isildar (2016) ²	Yazici; Devici (2014) ³	Oguchi (2011) ³	Yamane (2012) ³	Cucchiella (2015) ⁴	Silvas (2014) ⁵	Rebello (2018) ⁶
Cu	19,06	25,76	33,0	18,5	20,0	23,79	19,0	32,50	9,45
Sn	4,47	3,58	-	4,91	-	6,23	-	0,96	-
Ni	1,17	1,36	1,15	0,43	0,27	0,37	0,57	0,34	0,076
Zn	0,68	0,63	0,5	-	0,27	4,22	1,6	0,64	-
Pb	0,26	0,40	1,3	2,66	2,3	4,19	0,98	-	-
Mn	0,19	0,02	-	-	-	-	-	-	-
Ag	0,13	-	0,38	-	0,057	0,13	0,11	0,31	0,038
Sr	0,12	0,04	3,5	-	1,8	-	1,6	-	-
Au	0,11	0,01	0,15	-	0,024	0,15	0,063	0,004	0,035
Pt	0,001	-	-	-	-	-	-	-	-
Al	-	0,69	1,5	1,33	1,8	4,26	1,8	3,73	11,09
Fe	-	1,62	1,8	2,05	1,3	5,28	3,7	1,42	-

¹ Tablets; ² Celulares; ³ Desktops; ⁴ Notebooks; ⁵ Impressoras; ⁶ Lâmpadas de LED

As concentrações observadas nas PCI caracterizadas (Tabela 3) são condizentes com os estudos comparados. Os resultados obtidos por Motta (2018) para PCI de *tablets* apresentaram concentração de cobre, níquel e chumbo maiores do que as encontradas neste estudo, o que pode ser explicado pelo uso de modelos diferentes de *tablets* na composição da amostra.

A concentração de chumbo (0,26% em massa) encontrada é menor do que a de outros estudos (entre 0,4 e 4,19% em massa), sendo este um fator positivo, visto que corresponde a um metal tóxico (ROCHA, 2009), e também pode ser atribuída a variação das amostras com relação aos modelos, idades, fabricantes, dentre outros.

Com relação aos metais não quantificados (6,77% em massa), em comparação com as caracterizações citadas na Tabela 2, além dos metais que não foram determinados pela técnica de ICP MS, como ferro e alumínio, outros metais que poderiam compor esta fração são o cobalto, bário e tântalo (OGUCHI *et al.*, 2011; CUCCHIELLA *et al.*, 2015; ISILDAR *et al.*, 2016).

Dependendo do metal que se deseja recuperar, como no caso dos metais preciosos, nem sempre é viável economicamente utilizar uma categoria de REEE, já que a composição, ainda que dentro da mesma categoria, também varia, conforme demonstrado por Yamane *et al.* (2011), cuja pesquisa evidenciou ser mais vantajoso reciclar celulares e computadores separadamente quando o metal de interesse é o ouro.

Dessa forma, caracterizar o resíduo de equipamento eletroeletrônico contribui diretamente na definição do seu respectivo potencial/rota de reciclagem, e se é mais vantajoso separar ou agregar equipamentos da mesma categoria. (MARTINHO *et al.*, 2017).

A caracterização desta pesquisa mostrou a similaridade entre as composições de PCI de *tablets*, celulares e computadores. Motta (2018) demonstrou a viabilidade técnica da recuperação de cobre de PCI de *tablets* via lixiviação ácida por ácido nítrico, atingindo 92,02% de recuperação.

Entretanto, devem-se considerar as características de cada tipo de processo, e sabendo da existência de técnicas mais sensíveis a tais diferenças de composição, como a biolixiviação, deve-se testá-los a fim de identificar se há alteração significativa no resultado final do processo e sua viabilidade técnica e econômica.

CONCLUSÃO

Conclui-se que placas de circuito impresso de *tablets* são similares em composição às PCI de outros equipamentos eletroeletrônicos, como computadores e celulares, sendo de interesse econômico e ambiental a recuperação de metais destes REEE.

Recomenda-se o estudo de técnicas de recuperação de metais a partir deste REEE, a fim de avaliar sua viabilidade econômica e técnica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABDI - AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. Desempenho Setorial. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/abinee/decon/decon15.htm>>. Acesso em: 01 mai 2017.
2. CUCCHIELLA, F.; D'ADAMO, I.; KOH, S.C.L.; ROSA, P. Recycling of WEEES: An economic assessment of present and future e-waste streams. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n. 51, p. 263-272, 2015.
3. CUI, J.; FORSSBERG, E. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review. *Journal of Hazardous Materials*, v. 99, p. 243-263, 2003.
4. GOSH, B.; GOSH, M. K.; PARHI, P.; MOKHERJEE, P. S.; MISHRA, B. K. Waste Printed Circuit Boards recycling: an extensive assessment of current status. *Journal of Cleaner Production*, v. 94, p. 5-19, 2015.
5. GUAN, J.; WANG, J.; MIN, X.; WU, W. The products characteristics of calcium-basic compounds pyrolysis with waste printed circuit boards (PCB). *The 7th International Conference on Waste Management and Technology. Procedia Environmental Sciences*, v. 16, p. 461-468, 2012.
6. HE, W.; LI, G.; MA, X.; WANG, H.; HUANG, J.; XU, M.; HUANG, C. WEEE recovery strategies and the WEEE treatment status in China. *Journal of Hazardous Materials*, v. B136, p. 502-512, 2006.
7. HONDA, S.; KHETRIWAL, D.S.; KUEHR, R. Regional e-waste monitor: East and Southeast Asia. *United Nations University & Ministério de Meio Ambiente do Japão*, 213f., 2016.

8. ISILDAR, A.; VAN DE VOSSENBERG, J.; RENE, E. R.; VAN HULLEBUSCH, E. D.; LENS, P.N.L. Two-step bioleaching of copper and gold from discarded printed circuit boards (PCB). *Waste Management*, v. 57, p. 149-157, 2016.
9. JIANG, P.; HARNEY, M.; SONG, Y.; CHEN, B.; CHEN, Q.; CHEN, T.; LAZARUS, G.; DUBOIS, L.H.; KORZENSKI, M.B. Improving the end-of-Life for electronic materials via sustainable recycling methods. *The 7th International Conference on Waste Management and Technology. Procedia Environmental Sciences*, v. 16, p. 485-490, 2012.
10. KUMAR, A.; HOLUSZKO, M.; ESPINOSA, D. C. R. E-waste: An overview on generation, collection, legislation and recycling practices. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 122, p. 32-42, 2017.
11. LADOU, J. Printed circuit board industry. *International journal of hygiene and environmental health*, v. 209, p. 211-219, 2006.
12. MARQUES, A. C.; CABRERA, J. M.; MALFATTI, C. F. Printed circuit boards: A review on the perspective of sustainability. *Journal of Environmental Management*, v. 131, p. 298-306, 2013.
13. MARTINHO, G.; MAGALHÃES, D.; PIRES, A. Consumer behavior with respect to the consumption and recycling of smartphones and tablets: An exploratory study in Portugal. *Journal of Cleaner Production*, v. 156, p. 147-158, 2017
14. MEHL, E. L. M. Conceitos Fundamentais sobre Placas de Circuito Impresso. Universidade Federal do Paraná – UFPR. Disponível em: <http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/te232/textos/PCI_Conceitos_fundamentais.pdf>. Acesso em: 20 jan 2017.
15. MOTTA, V. C. N. Extração de cobre de placas de circuito impresso de tablets por lixiviação ácida e precipitação seletiva. Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, dissertação de mestrado, 66f. Vitória, 2018.
16. OGUCHI, M.; MURAKAMI, S.; SAKANAKURA, H.; KIDA, A.; KAMEYA, T. A preliminary categorization of end-of-life electrical and electronic equipment as secondary metal resources. *Waste Management*, v. 31, ed. 9-10, p. 2150-2160, 2011.
17. PARK, Y. J.; FRAY, D. J. Recovery of high purity precious metals from printed circuit boards. *Journal of Hazardous Materials*, v. 164, p. 1152 – 1158, 2009.
18. REBELLO, R.Z. Recuperação de ouro e prata de lâmpadas de LED inservíveis por lixiviação em tiouréia. Universidade Federal do Espírito Santo, Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Ambiental, 68f. Vitória, 2018.
19. ROCHA, G. H. T.; GOMES, F. V. B.; STREICHER-PORTE, M.; PORTUGAL, S. M.; ALMEIDA, R. N.; RIBEIRO, J. C. J. Diagnóstico da geração de resíduos eletroeletrônicos no estado de Minas Gerais. Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), 80f. Governo Minas Gerais, Minas Gerais, Brasil, 2009.
20. RUBIN, R. S. Método de desmontagem de placas de circuito impresso provenientes de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos para reciclagem. Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Elétrica, 186f. São Carlos, 2014.
21. SILVAS, F. P. C. Utilização de hidrometalurgia e biohidrometalurgia para reciclagem de placas de circuito impresso. Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, tese de doutorado, 144 p. São Paulo, 2014.
22. VEIT, H. M. Emprego do processamento mecânico na reciclagem de sucatas de placas de circuito impresso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, dissertação de mestrado, 96f. Porto Alegre, RS, 2001.
23. YAMANE, L. H. Recuperação de metais de placas de circuito impresso de computadores obsoletos através de processo biohidrometalúrgico. Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, tese de doutorado, 128f. São Paulo, 2012.
24. YAMANE, L. H.; DE MORAES, V. T.; ESPINOSA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S. Recycling of WEEE: Characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers. *Waste Management*, v. 31, p.2553-2558, 2011.
25. YAZICI, E. Y.; DEVICI, H. Ferric sulphate leaching of metals from waste printed circuit boards. *International Journal of Mineral Processing*, v. 133, p. 39-45, 2014.