

REVISÃO DAS TÉCNICAS UTILIZADAS NA RECUPERAÇÃO DE METAIS EM RESÍDUOS DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO (RPCI)

Rosana Gonçalves Ferreira Franco (*), Raphael Tobias de Vasconcelos Barros

* Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), gf.rosana@gmail.com

RESUMO

A crescente dependência da humanidade por bens de consumo eletrônicos e a obsolescência programada destes, seja por inovação tecnológica, inviabilidade econômica do reparo ou *status* social gera um alto índice de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE). De acordo com ITU (2015) foram produzidos no Brasil, em 2014, 1,4 milhão de toneladas de resíduos eletrônicos, o que representa 52% dos resíduos eletrônicos gerados nos países da América Latina, colocando o Brasil no primeiro lugar do *ranking*. As placas de circuito impresso (PCI) são componentes essenciais dos equipamentos elétricos e eletrônicos (EEE), e são compostas por metais de base e metais preciosos. O presente estudo foi realizado com o objetivo de identificar, nas literaturas nacional e internacional, as práticas de recuperação de metais em resíduos de placas de circuito impresso (RPCI), no intuito de que as mesmas possam servir de subsídios para desenvolvimento de tecnologias nacionais para recuperação destes metais. Como resultado, constatou-se que processos pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos e biotecnológicos são aplicados na recuperação de metais dos RPCI. Concluiu-se que não existe um único método eficiente para a recuperação dos metais e, sim, combinações de processos que viabilizam esta reciclagem. A situação do mercado local – que normalmente não precifica adequadamente o processo de reciclagem nem os produtos reciclados - continua sendo a principal determinante para a viabilidade de qualquer destes processos de recuperação, mais do que o estágio tecnológico ou mesmo as exigências legais. A contribuição dos geradores de RPCI, na forma de uma separação na fonte que ajude as etapas subsequentes da recuperação, precisa ser mais expressiva. O desenvolvimento de tecnologias limpas para recuperação de metais em REEE é significativo e necessita atender dois objetivos principais: a recuperação de energia (pelo uso de materiais recicláveis no lugar de matérias primas virgens) e a redução da poluição.

PALAVRAS-CHAVE: resíduos eletrônicos, placas circuito impresso, recuperação metais.

INTRODUÇÃO

As placas de circuito impresso são componentes essenciais nos equipamentos elétricos e eletrônicos e são classificadas de acordo com o material que compõe sua base, designada de laminado, podendo ser de aglomerado de papel e resinafenólica (fenolite) ou laminado de fibra de vidro (resina epóxi com manta de fibra de vidro). As chapas para circuito impresso de fenolite são denominadas como FR-2, e as de fibra de vidro como FR-4 (a sigla FR vem da expressão em inglês *flame resistant*, ou seja, resistente ao fogo).

Devido à natureza diversa e complexa das PCI usadas, sua caracterização deve ser feita em termos de tipos, estruturas, componentes e composição. De acordo com a composição da PCI é que se estabelece a rota e o processo de reciclagem (para recuperação de metais). Em linhas gerais as PCI são compostas de materiais cerâmicos, vidros e óxidos (30%), plásticos (30%) e metais (40%) (Greco *et al.*, 2015). Metais como ouro, prata, cobre, estanho, chumbo, zinco, paládio, ferro e níquel estão presentes nas PCI (Fogarasi *et al.*, 2014; Landinet *et al.*, 2012; Park e Fray, 2009). A Tab. 1 apresenta a composição típica de metais nas PCI.

Tabela 1: Composição de metais nas placas de circuito impresso - Fonte: Goosey e Kellner (2002).

Metais	Au	Pd	Ag	Cu	Al	Fe	Sn	Pb
% Peso	0,025	0,010	0,100	16,000	5,000	5,000	3,000	2,000

Entre os resíduos dos equipamentos elétricos e eletrônicos os RPCIs são os componentes mais complexos e perigosos, estes contêm mais de 60 elementos químicos incluindo metais pesados (como Pb, Cr, Cd, Hg, As) e substâncias orgânicas tóxicas (tais como retardadores de chama bromados e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos). A maioria destas substâncias é de potencial bioacumulativo e de alta persistência ambiental o suficiente para causar sérios danos a diversas partes do corpo. Se os RPCI não forem eliminados ou valorizados adequadamente, esses materiais tóxicos são liberados para o meio ambiente prejudicando a saúde humana por meio do contato direto e da cadeia alimentar (HUANG *et al.*, 2009).

Segundo com Goosey e Kellner (2002), os RPCI são separados em três categorias, de acordo com o conteúdo de metal precioso presente, sendo H (alta qualidade), M (média qualidade) e L (baixa qualidade):

- material com baixa qualidade compreende as placas de televisão e as fontes de alimentação de alta potência com transformadores de ferrite e grandes dissipadores de calor de alumínio;
- material de média qualidade se constitui a partir de equipamentos de alta confiabilidade, com o conteúdo de metal precioso, a partir de conectores de pinos e de borda e com pouco material como capacitores de alumínio;
- material de alta qualidade compreende componentes discretos, circuitos integrados (CI) contendo ouro, dispositivos eletrônicos, placas ópticas contendo metais preciosos, alfinete de ouro e pinos de placas de paládio etc.

A Fig. 1 apresenta os modelos de PCI, de acordo com sua qualidade, para recuperação de metais.

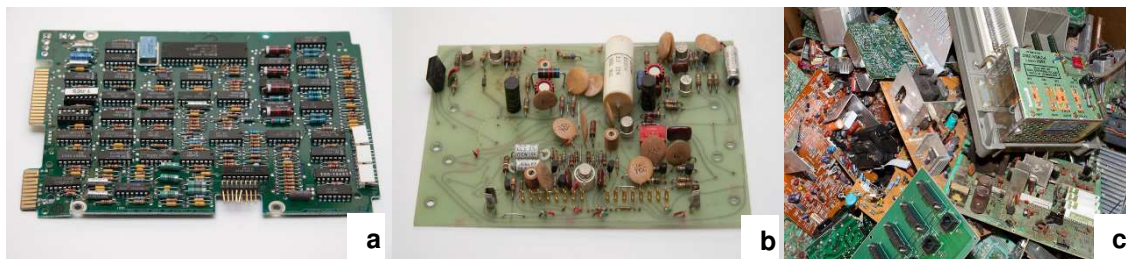


Figura 1: a) material de alta qualidade, com “fingers”, pinos e circuito integrado; b) material de média qualidade; c) material de baixa qualidade.

Fonte:: <http://therefiningcompany.com/We-Buy-Circuit-Boards.aspx>. Acesso em 24.11.2015.

Geralmente, os metais nos processos de reciclagem são agrupados em metais preciosos (MPs), metais do grupo da platina (MGPs), metais de base (MBs), metais de interesse /perigosos (MIs), e elementos escassos (ES), tais como apresentado na Tab.2.

Tabela 2: Denominação dos metais na indústria de reciclagem - Fonte: Khaliqet al., 2014 (adaptado).

Denominação	Metais
MP	Au, Ag
MGP	Pd, Pt, Rh, Ir e Ru
MB	Cu, Al, Ni, Sn, Zn, e Fe
MI (perigosos)	Hg, Be, In, Pb, Cd, As e Sb
ES	Te, Ga, Se, Ta e Ge

Processos pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos e biotecnológicos ou combinações destes são aplicados na recuperação de metais dos RPCI. A alta temperatura dos processos pirometalúrgicos faz com que esta tecnologia requeira altos investimentos. A pirólise a baixa temperatura é um processo alternativo de reciclagem dos RPCI: no processo, o material orgânico é decomposto em moléculas menores e pode ser usado como combustível ou como insumos químicos. A pirólise a vácuo apresenta várias desvantagens em relação aos outros processos porque os vapores de moléculas orgânicas de baixo peso molecular permanecem um tempo no reator. Os processos hidrometalúrgicos requerem várias etapas, como lixiviação ácida ou cáustica dos materiais sólidos, processos de separação e purificação. Os processos biotecnológicos usam microrganismos para recuperação de metais, podendo ocorrer de duas maneiras: por biolixiviação ou por biosorção.

METODOLOGIA

A pesquisa foi realizada no acervo de periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), em especial nas bases *Science Direct*, *Scielo*, *Scopus* e *Web of Science*, obras literárias e sites oficiais de órgãos governamentais e não governamentais dos países estudados. Após a identificação, as informações foram sistematizadas por meio de tabelas e fluxogramas.

RESULTADOS

Na recuperação de metais dos RPCI estão inseridos processos mecânicos e químicos. Fazem parte do processo mecânico a fragmentação, a moagem, a classificação e a separação dos diferentes compostos e componentes dos resíduos, sendo que a separação pode ocorrer por diferença de densidade, de peso e de granulometria, ou por propriedades magnéticas e elétricas, entre outros métodos. A fragmentação e moagem estão presentes em todos os processos de recuperação de metais dos RPCI; além de diminuir o volume, estes processos aumentam a superfície de contato, para ação dos lixivantes químicos. No entanto, após a determinação do tamanho ideal da partícula, para o processo utilizado, técnicas físico-químicas são aplicadas para dissolução e recuperação dos metais de interesse, sendo a hidrometalurgia e a eletrometalurgia processos que trabalham diretamente com soluções químicas específicas, e a pirometalurgia um processo que necessita do uso de altas temperaturas para atingir o objetivo.

Os processos pirometalúrgicos caracterizam-se pelo uso de altas temperaturas no processamento de materiais, o mecanismo consiste em promover a concentração de uma fase metálica e uma fase contendo escória. Os metais ficam concentrados na fase metálica, as cerâmicas na escória e os polímeros são degradados termicamente, sendo esta uma desvantagem do processo, pois pode ocorrer a geração de dioxinas e furanos. Flandinet *et al.* (2012), Zhou e Qiu (2010) e Quan *et al.* (2010) utilizaram processos pirometalúrgicos na extração de metais. A síntese dos trabalhos está apresentada na Tab. 3.

Tabela 3: Processos pirometalúrgicos de separação de metais RPCI

Metais Recuperados	Principais características do processo	Resultado principal	Referência
Au, Ag, Cu e Ni	Mistura eutética de KOH-NaOH (59% p/p e 41% p/p, respectivamente). Ocorre a dissolução de vidros, óxidos e plásticos, sem oxidar os metais valiosos	Fibra de vidro, resinas e plásticos são totalmente eliminados. Recuperação de: Ni=0,95g/kg; Cu=287 g/kg; Au=0,725 g/kg e Ag=0,238 g/kg.	Flandinet <i>et al.</i> (2012),
Diversos	Reciclagem para solda e material orgânico. Duas amostras, tipo A: feita a partir de celulose de papel reforçado e resina fenólica; tipo B: feita de resina reforçada com fibra de vidro epoxi.	Tipo A: teve seu balanço de massa de 69,5% p/p de resíduos, 27,8% p/p em óleo e 2,7% p/p de gás. Tipo B: apresentou 75,7% p/p de resíduos, 20% p/p de óleo e 4,3% p/p de gás. Resíduos: contém metais que podem ser recuperados. Óleo e gás: usados como combustível no processo.	Zhou e Qiu (2010)
Diversos	O experimento foi realizado em um reator de leito fixo, a temperatura de 700°C	17,8% de peso em líquido; 5,4% em peso de gases e 76,8% em peso de resíduo sólido. Óleo: pode ser reutilizado como matéria prima para a produção de resina fenólica Resíduos sólidos obtidos foram muito frágeis e propensos a delaminação e podem ser facilmente liberados em carbono (5,56%), fibra de vidro (66,77%) e frações metálicas (27,67%). Fibras de vidro: podem ser recuperadas inalteradas, por meio de combustão controlada e podem ser reaproveitadas em misturas para composto de moldagem em folha ou em massa como substituto de enchimento	Quan <i>et al.</i> (2010)

O processamento hidrometalúrgico consiste na dissolução de metais pela ação de soluções aquosas ou agentes lixivantes. As etapas genéricas do processo são: preparação da amostra, lixiviação, separação sólido/líquido, tratamento da solução e recuperação do metal ou metais de interesse. A preparação da amostra consiste na retirada de componentes que interferem no processo e a fragmentação (corte e moagem). Na etapa de lixiviação o metal ou metais de interesse são solubilizados por ácidos ou outros agentes lixivantes: geralmente, os metais de base são lixiviados em ácido nítrico, a solda com o ácido fluorobórico, o cobre ácido sulfúrico ou água régia, sendo que a água régia também pode ser usada para o ouro e prata (estes metais são geralmente lixiviado por tiourea). Após as etapas de lixiviação, o emprego de técnicas como cementação, extração por solvente, adsorção por carvão ativado e troca iônica, são usadas para recuperação dos metais.

Autores como Caldas *et al.* (2015), Machado *et al.* (2014), Petter *et al.* (2014), Huang *et al.* (2014), Zhang e Zhang (2014), Pombo e Lange (2014), Birloaga *et al.* (2013), Behnamfard *et al.* (2013), Joda e Rashchi (2012), Jha *et al.* (2012), Jong-ying *et al.* (2012), Havlik *et al.* (2011), Xiu e Zhang (2010), Park e Fray (2009), Kamberovic *et al.* (2009), Martins (2007) e Sheng e Etsell (2007), estudaram a extração de metais dos RPCI usando a técnica de hidrometalurgia, a síntese destes trabalhos está feita na Tab. 4.

Tabela 4: Processos hidrometalúrgicos de separação de metais dos RPCI

Metais Recuperados	Principais características do processo	Resultado principal	Referência
Au	Lixiviação com tiourea (60°C; 2 horas; relação sólido/líquido = 20g/100mL)	Concentração de Au na solução 182 mg/L	Machado et al (2014)
Au e Ag	Lixiviação a água régia, uma solução comercial de cianeto e o ácido nítrico, e uma lixiviação alternativa com tiosulfato de sódio e tiosulfato de amônio	Água régia = Au: 880g/t e Cu: 376kg/t. Ag = 100% (3,494g/t) recuperação com ácido nítrico. Au = 500g/t com cianeto Lixiviação com tiosulfato de sódio e tiosulfato de amônio apresentou baixa eficiência	Petter et al (2014)
Cu	Lixiviação por uma solução iônica de ácido Brønsted ((bmim)HSO ₄)	99,17% de recuperação do Cu.	Huang et al (2014)
Pd	Solução especial feita de CuSO ₄ e NaCl	Pb (II) recuperado foi de 96,99%. Agente lixiviante recuperado para reuso no processo.	Zhang e Zhang (2014)
Au e Cu	Lixivante tiourea. Condições ótimas de lixiviação (2 M de H ₂ SO ₄ ; 20 mL de H ₂ O ₂ ; 30% p e 30°C)	90% de remoção do Cu 69% de remoção do Au	Birloaga et al (2013)
Cu, Ag, Au e Pd	Foram usadas 4 etapas de lixiviação - 1ª. e 2ª. Etapas - ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio; 3ª. Etapa - ácido sulfúrico, tiourea e íon férrico e na 4ª. Etapa - ácido clorídrico, peróxido de hidrogênio e hipoclorito de sódio	1ª etapa de lixiviação: recuperação de 85,76% do Cu; valor aumentando para 99% após a 2ª etapa de lixiviação. 3ª. Etapa foram lixiviados 84,31% de ouro e 71,36% de prata, valores aumentados para 100% quando adicionado no processo borohidreto de sódio (SBH).	Behnamfard et al (2013)
Cu e Ag	Granulação ultrafina (400nm) Agente lixivante - ácido nítrico Condições ótimas: 72min, 65°C, razão sólido/líquido 5ml/g, concentração do lixivante 4M	82,56% recuperação de Ag 94,08% recuperação de Cu.	Joda e Rashchi (2012)
Sn (solda)	Solução orgânica (N-N dimetilformamida-100g/L) durante 2 horas a temperatura de 120°C	97,79% recuperado de Sn 2,9% recuperado de Pb remanescente do resíduo	Jha et al (2012)
Au e Ag	lixiviação com tiourea condição ótima encontrada foi de tamanho de partícula de PCB 100 mesh, com as soluções contendo 24 g/L de tiourea e concentração de Fe ³⁺ de 0,6% sob a temperatura ambiente	90% recuperação do Au 50% recuperação da Ag	Jong-ying et al (2012)
Cu e Sn	As amostras foram pré-tratadas termicamente as temperaturas de 300, 500, 700 e 900 ° C durante 15, 30 e 60 min, antes da lixiviação. Solução de lixiviação de 1 M de HCl, 80 ° C.	Maior recuperação de Cu na amostra com pré-tratamento térmico (80%). A recuperação do Sn, após o tratamento térmico é menos eficiente. Remoção do plástico em temperaturas de 700 a 900°C é de 35%	Havlik et al (2011)
Cu, Fe, Sn, Pb e Zn	Metanol supercrítico-SCM (temperatura e pressão acima do seu ponto crítico). Condições ótimas: faixa de temperatura de 300-420 °C, tempo de tratamento entre 30 e 120 min e a relação sólido para líquido (S / L) de 1: 10-1: 30 (g / mL)	Produto sólido enviado a metalurgia: Cu (34%), Fe (7,9%), Sn (7,9%), Pb (6,3%) e Zn (2,6%) . Óleos gerados: fenol, derivados de fenol e aditivos retardadores de chama (enviados para refino) Baixa concentração de Au e Ag	Xiu e Zhang (2010)
Au, Ag e Pd	Foi usado água régia com agente lixiviante. A razão entre metal/lixivante ideal é de 1/20 (g/mL).	93% de recuperação de Pd 98% de recuperação da Ag 97% de recuperação do Au	Park e Fray (2009)
Zn, Ni, Cu, Au, Ag e Pd	Processos de lixiviação foram usados: com ácido flúor bórico (HBF ₄) para separação de estanho e chumbo da solda; para extração e recuperação do cobre e metais preciosos processamentos hidrometalúrgicos, sendo lixiviação com ácido sulfúrico e precipitação para a recuperação do Cu; lixiviação com cloreto, seguido de cementação para recuperação de Pd, Ag, Au e Cu e cianetação e adsorção em carbono ativado para a recuperação de Ag e Au	Solda=7% p/p, recuperado: Sn: 4,2 % p/p; Pb:2,8 % p/p. Recuperação de metais de base. Recuperação de metais preciosos.	Kamberovic et al (2009)
Sn e Cu	Soluções lixivantes (2,18N H ₂ SO ₄ , 2,18N H ₂ SO ₄ +3,0N HCl, 3,0N HCl ou 3,0N HCl=1,0N HNO ₃),	O sistema 3,0N HCl=1,0N HNO ₃ foi o que apresentou os melhores resultados para Sn (98%) e Cu (93%)	Martins (2007)
Au	Chips computadores foram tratados com ácido nítrico para dissolução dos metais de base; o resíduo foi lixiviado com água régia; o sulfato ferroso foi usado para precipitação do Au.	Flocos de ouro	Sheng e Etsell (2007)
Au e Ag	Fragmentos de REEE de 0,5mm foram tratados com uma solução de KI e I ₂ ou NaCl e bleaching powder; foi usado extração com solvente para recuperação do Au e da Ag.	Au e Ag	Shibata e Matsumoto (2007)

Os processos eletrometalúrgicos ocorrem em células eletrolíticas (Tab. 5). Os tipos mais usados são os de eletroextração e eletrorrefino. A eletroextração é um processo de eletrólise utilizado para recuperar os metais em solução aquosa, usualmente como resultado de um material submetido a um ou mais processos hidrometalúrgicos. O metal de interesse é revestido sobre o cátodo, enquanto que o ânodo é um condutor elétrico inerte. A eletrorrefinação é utilizada para dissolver um ânodo metálico impuro (tipicamente a partir de um processo de fusão) e produzir um cátodo de alta pureza.

Tabela 5: Processos eletrometalúrgicos de separação de metais dos RPCI

Metais Recuperados	Principais características do processo	Resultado principal	Referências
Au e Cu	Método de oxidação eletroquímica mediada	99,04% de cobre com elevado teor de pureza e a concentração de ouro no resíduo sólido foi 25 vezes mais elevada do que a concentração de ouro nas amostras iniciais dos RPCI	Fogarasi <i>et al</i> (2014)
Cd, Cr, Cr, Zn e Mn	processo de eletrocinética (EC) com diferentes agentes auxiliares (ácido nítrico, ácido clorídrico e ácido cítrico).	Oxidação dos metais pesados de aproximadamente 100%, com excessão do Ni (52%) e do Mn (56%).	Xiu e Zhang (2009)
Cu, Pb e Sn	Lixiviação das PCI com HNO ₃ ; recuperação dos metais base por eletrodeposição.	Cu, Pb e Sn	Mecucci e Scott (2002)
Sn e Pb	Solda foi dissolvida com uma solução comprising Ti (IV) e um ácido. Sn e Pb foram recuperados por eletrolise.	Sn e Pb	Gibson <i>et al</i> (2003)

Nos processos biohidrometalúrgicos são utilizadas bactérias, fungos ou algas para obtenção de metais. Por meio da lixiviação bacteriana, ou biolixiviação, microrganismos são empregados para solubilizar metais por oxidação. Este procedimento não requer muitos recursos, tem baixo gasto energético e não emite gases para a atmosfera; no entanto, cada tipo de metal/minério precisa de um tipo diferente de microrganismo (LI *et al* 2015).

O processo de lixiviação bacteriana é um fenômeno bioquímico; contudo, também pode ser considerado como um processo eletroquímico, pois ocorre transferência de elétrons do mineral para o microrganismo; portanto, a biolixiviação nada mais é que um processo de corrosão. Há duas maneiras da biometalurgia recuperar metais, os processos de biolixiviação e os processos de biosorção. A biolixiviação é muito aplicada em extração de metais de base e metais preciosos de minerais contendo enxofre em sua composição. Na biosorção ocorre uma interação físico-química entre os íons em solução e os microrganismos. São conhecidos inúmeros microrganismos, como algas, bactérias, fungos e leveduras capazes de acumular ativamente metais pesados e metais preciosos (CUI & ZHANG, 2008).

Tabela 6: Processos biometalúrgicos de separação de metais dos RPCI

Metais Recuperados	Principais características do processo	Resultado principal	Referências
Au e Cu	<i>Chromobacterium violaceum</i> , bactéria geradora de cianeto, para lixiviar ouro. <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> : oxidação dos íons férricos e redução dos compostos de enxofre.	Lixiviação de cobre foi acima de 80% e de ouro de 70,6%	Li <i>et al</i> (2015)
Au e Cu	<i>Bacillus megaterium</i> : foi utilizado para produzir cianeto como agente de lixiviação. <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> : para extração do cobre.	Ouro recuperação de 36,81% e Cobre recuperação de 13,26%. Após extração do cobre, 63,8% do Au foi extraído.	Arshadi e Mousavi (2012)
Zn, Cu, Pb, Ni, Cd e Cr	Dois meios de culturas: M I (cultura de <i>Acidithiobacillus sp.</i> , com 1% de enxofre) e M II (cultura de <i>Bacillus subtilis</i> PCM 2021 e <i>Bacillus cereus</i> PCM 2019, com 1% de enxofre e biosurfactante).	Zn: removido eficazmente nas duas culturas, tendo como eficiência média de 48% de dissolução. Cd: semelhante nas duas culturas, com liberação de 93% do metal. Ni e Cd: o melhor efeito foi obtido na forma ácida, com um rendimento de processo de 48,5% e 53%, respectivamente. Cr: liberação nos dois meios de cultura (23%). Pb: obteve remoção muito baixa (inferior a 0,5%).	Karwowska <i>et al</i> (2014)
Cu	<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> : oxidação dos íons férricos e redução dos compostos de enxofre.	A taxa de cobre solubilizado foi de 56%.	Yamane <i>et al</i> (2013)
Cu, Al e Zn	Bactérias de drenagem ácida de minas (ADM). Bactérias acidófilas (MCAB) enriquecidas com ADM	eficiência de lixiviação de cobre é de 96,8% (em 45h), de alumínio é 88,2% e de zinco, 91,6% ambos em 98 horas.	Zhu <i>et al</i> (2011)
Cu	Consórcio bacteriano - bactérias de drenagem ácida de mina enriquecida com outras bactérias	A taxa máxima de lixiviação do cobre de 95% foi alcançada após 5 dias	Xiang <i>et al</i> (2010)
Cu, Zn e Pb	<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> (<i>A. ferrooxidans</i>) e <i>Acidithiobacillus thiooxidans</i> (<i>A. thiooxidans</i>) e associações destas bactérias	Zn e Pb obtenção, em torno de, 88,9% Cu obtenção de 74 a 99,9%.	Wang <i>et al</i> (2009)

Industrialmente o refino dos metais dos RPCI não é feito no Brasil, pois são necessários altos investimentos em plantas industriais de recuperação de metais e uma grande quantidade de sucata para tornar o processo economicamente viável. Assim, as placas de circuito impresso são trituradas e exportadas para outros países, tais como Canadá, Bélgica e Cingapura. Os processos mecânicos, que são mais baratos que os processos metalúrgicos, são realizados no Brasil e viabilizam o envio dos RPCI para exportação. Após as etapas de cominuição e classificação granulométrica, obtém-se um concentrado com cerca de 24% de cobre, enquanto que no minério o valor varia de 1 a 3% de cobre (GERBASE E OLIVEIRA, 2012).

Vivas e Costa (2013) analisaram os processos de recuperação de metais das placas de circuito impresso por meio da metodologia de Análise Hierárquica dos Processos. Foram estudados o aspecto ambiental (consumo de energia,

consumo de água e geração de resíduos) e a eficiência produtiva (tempo de processo, percentual de recuperação e custos) dos processos. No aspecto ambiental, os processos biotecnológicos e hidrometalúrgicos são mais adequados e, no aspecto de eficiência produtiva, os processos biotecnológicos e eletrometalúrgicos são mais adequados.

Como uma das vantagens de utilização da biolixiviação, destaca-se a economia de insumos (ácidos e agentes oxidantes). Tal utilização também evitaria a emissão de poluentes gasosos, fato que ocorre com os processos hidrometalúrgicos e pirometalúrgicos tudo iria ao encontro da tendência mundial pela busca de processos “ambientalmente amigáveis” (Yamane *et al.* 2011). A guisa de ilustração, a Tab. 7 apresenta um resumo dos métodos estudados para recuperação de metais dos RPCI.

Tabela 7: Resumo dos métodos estudados para recuperação de metais dos RPCI

Processo	Vantagens	Desvantagens
Hidrometalurgia: reações de dissolução dos materiais em soluções lixivantes ácidas ou alcalinas, seguida de separação por filtração, destilação e precipitação dos metais de interesse.	Economia de energia. Menor impacto ambiental quando comparado a pirólise.	Alto volume de água residuais ácidas. Natureza complexa dos REEE. Processo lento. Perda de MP durante a fragmentação. Agentes lixivantes com alta toxicidade.
Pirometalurgia: a etapa de transformação química depende do material de partida, podendo ser: calcinação (decomposição pelo calor na presença de oxigênio), ustulação (calcinação aplicada a sulfetos) ou pirólise (decomposição pelo calor em um ambiente com pouco ou nenhum oxigênio).	Remoção material orgânico. Possibilidade de reaproveitamento do gás gerado com combustível no processo. Natureza complexa dos REEE.	Queima de combustíveis fósseis. Emissão de dioxinas na queima de polímeros clorados. Não permite a recuperação do plástico. Fe e Al viram escória, na forma de óxido. Alto custo das plantas industriais. Técnicas eletroquímicas e hidrometalúrgicas subsequentes são necessários para os extrair metais de interesse.
Eletrometalurgia: recuperação de metais por meio de eletrólise. Envolve reações de oxirredução. Metais se dissolvem em forma de íons metálicos e são eletrodepositados no cátodo.	Menor impacto ambiental quando comparado a pirólise. Sem geração de gases poluentes. Variedade de metais recuperados.	Natureza complexa dos REEE. São necessárias técnicas pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas antecedentes.
Biometalurgia: interações de microrganismos com minerais. Biolixiviação com sulfetos metálicos.	Remoção material orgânico. Possibilidade de reaproveitamento do gás gerado com combustível no processo. Natureza complexa dos REEE.	Alto tempo de processo. Condicionamento do microrganismo para o ambiente. Baixo número de pesquisas para recuperação de metais em REEE. Natureza complexa dos REEE.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Dado o aumento da produção dos REEE e seu potencial poluidor – não faltam exemplos de contaminação grave resultante de seu manuseio inadequado -, é absolutamente imprescindível que sejam objeto de uma gestão que respeite a hierarquia convencional (não geração, minimização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente adequada). Ademais, a valorização destes resíduos retrata a oportunidade e a procedência do aproveitamento de seus materiais e componentes, mas que ainda se mostram incipientes no Brasil.

Os procedimentos industriais visando a seu reaproveitamento e à reciclagem são idealmente os mesmos para estes REEE; conclui-se que não existe um único método eficiente para a recuperação dos metais e sim combinações de processos que viabilizam esta reciclagem. A reciclagem dos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE) se mostra viável, devido à recuperação de metais preciosos presentes nas PCI, bem como a recuperação de energia por meio da reciclagem dos plásticos presentes nestes resíduos. Quaisquer processos de reciclagem serão mais eficientes se forem auxiliados por medidas que vêm desde a concepção dos equipamentos, considerando a análise de seu ciclo de vida, e se contarem com a colaboração dos usuários.

A situação do mercado local – que normalmente não precifica adequadamente o processo de reciclagem nem os produtos reciclados - continua sendo a principal determinante para a viabilidade de qualquer destes processos de recuperação, mais do que o estágio tecnológico ou mesmo as exigências legais. A contribuição dos geradores de RPCI, na forma de uma separação na fonte que ajuda as etapas subsequentes da recuperação, precisa ser mais expressiva. O desenvolvimento de tecnologias limpas para recuperação de metais em REEE é significativo e necessita atender dois objetivos principais: a recuperação de energia (pelo uso de materiais recicláveis no lugar de matérias primas virgens) e a redução da poluição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Arshadi, M. & Mousavi, S.M. **Enhancement of simultaneous gold and copper extraction from computer printed circuit boards using *Bacillus megaterium***. *Bioresource Technology* 175 (2015) 315–324.
2. Behnamfard, A.; Salarirad, M. M. & Veglio, F. **Process development for recovery of copper and precious metals from waste printed circuit boards with emphasize on palladium and gold leaching and precipitation**. *Waste Management* 33 (2013) 2354–2363.
3. Birloaga, I.; De Michelis, I.; Ferella, F.; Buzatu, M. & Vegliò, F. **Study on the influence of various factors in the hydrometallurgical processing of waste printed circuit boards for copper and gold recovery**. *Waste Management* 33 (2013) 935–941.
4. Caldas, M. P.; Moraes, V.; Junca, E.; Tenório, J. A. & Espinosa, D. **Reciclagem de Placas de Circuito Impresso Visando Recuperação de Prata: Estudo de uma Rota Hidrometalúrgica**. *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, São Paulo, v. 12, n. 2, abr./jun. 2015, p.102-108. Disponível em: <http://tecnologiammm.com.br/files/v12n2/v12n2a02.pdf>. Acesso em 08.01.2016.
5. Cui, J. & Zhang, L. **Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review**. *Journal of Hazardous Materials* 158 (2008) 228–256.
6. Flandinet, L.; Tedjara, F.; Ghetta, V. & Fouletier, J. **Metals recovering from waste printed circuit boards (WPCBs) using molten salts**. *Journal of Hazardous Materials* 213–214 (2012) 485–490.
7. Fogarasi, S.; Imre-Lucaci, F.; Imre-Lucaci, A. & Ilea, P. **Copper recovery and gold enrichment from waste printed circuit boards by mediated electrochemical oxidation**. *Journal of Hazardous materials*. 273 (2014) 215–221.
8. Gerbase, E. A. & Oliveira, R. C. **Reciclagem do Lixo de Informática: uma oportunidade para Química**. *Química Nova*, Vol. 35, no. 7, (2012) 1486–1492.
9. Goosey, M. & Kellner, R. **End-of-Life Printed Circuit Boards**. 2002. Disponível em: http://www.cfsd.org.uk/seeba/TD/reports/PCB_Study.pdf. Acesso em 26.nov.2015.
10. Greco, N. R.; Casqueira, R. G.; Paula, D. S. & Junior Machado, H. F. **Recuperação dos Metais Presentes em Placas de Circuito Impresso**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Instituto de Tecnologia - Departamento de Engenharia Química. 2015.
11. Havlik, T.; Orac, D.; Petranikova, M. & Miskufova, A. **Hydrometallurgical Treatment of Printed Circuit Boards After Thermal Treatment**. *Waste Management*. Vol.31. 1542–1546.
12. Huang, K.; Guo, J. & Xu, Z. **Recycling of waste printed circuit boards: a review of current technologies and treatment status in China**. *Journal of Hazardous Materials* 164 (2009) 399–408.
13. Huang, J.; Chen, M.; Chen H.; Chen, S. & Sun, Q. **Leaching behavior of copper from waste printed circuit boards with Brønsted acidic ionic liquid**. *Waste Management* 34 (2014) 483–488.
14. ITU – INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS UNION *et al.* **Gestión sostenible de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en América Latina**. Genève: ITU, 2015. 64p. Disponível em: http://www.who.int/ceh/publications/ewaste_latinoamerica/en/. Acesso em: 10 jun. 2016.
15. Jha, M. K.; Choubey, P. K.; Jha, A. K.; Kumari, A.; Lee, J.; Kumar, V. & Jeong, J. **Leaching studies for tin recovery from waste e-scrap**. *Waste Management* 32 (2012) 1919–1925.
16. Joda, N.N., Rashchi, F. **Recovery of ultra-fine grained silver and copper from PC Board scraps. Separation and Purification Technology**. 2012; 92:36-42.
17. Kamberović, Ž.; Korać, M.; Ivšić, D.; Nikolić, V. & Ranitović, M. **Hydrometallurgical Process for Extraction of Metals from Electronic Waste – Part I: Material Characterization and Process Option Selection** (2009).
18. Karwowska, E.; Andrzejewska-Morzuch, D.; Łebkowska, M.; Agnieszka Tabernacka, A.; Wojtkowska M.; Telepko A. & Konarzewskaba, A. **Bioleaching of metals from printed circuit boards supported with surfactant-producing bacteria**. *Journal of Hazardous Materials* 264 (2014) 203–210.
19. Khaliq, A.; Rhamdhani, M. A.; Brooks, G. & Masood, S. **Metal Extraction Processes for Electronic Waste and Existing Industrial Routes: A Review and Australian Perspective**. *Resources*, 3, (2014) 152–179; doi:10.3390/resources3010152.
20. Li, J. & Liang, C. & Ma, C. **Bioleaching of gold from waste printed circuit boards by *Chromobacterium violaceum***. *J Mater Cycles Waste Manag* (2015) 17:529–539
21. Machado, C.M.; Silva, M.L.; Calgaro, C.O. & Bertuol, D.A. **Aplicação de tioureia na lixiviação seletiva de ouro proveniente de processadores**. *Blucher Chemical Engineering Proceedings*. Dezembro de 2014, Volume 1, Número 1.
22. Martins, A.H. **Recuperação de estanho e cobre a partir da reciclagem de placas de circuito eletrônico de microcomputadores sucata**. *Estudos Tecnológicos*. Vol.3, (2007) 124–131.
23. Park, Y.J., Fray, D.J. **Recovery of high purity precious metals from printed circuit boards**. *Journal of Hazardous Materials* 164, (2009) 1152–1158.

24. Petter, P.M.; Veit, H.M. & Bernardes, A. M. **Evaluation of gold and silver leaching from printed circuit board of cellphones.** Waste Management 34 (2014) 475–482.
25. Pombo, F. R. & Lange, L. C. **Recuperação Hidrometalúrgica de Metais de Placas de Circuito Impresso.** ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. XI Seminário Nacional de Resíduos Sólidos (2014).
26. Quan, C., Li A.; Gao, N. & Zhang, Dan. **Characterization of products recycling from PCB waste pyrolysis.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 89 (2010) 102–106.
27. Sheng, P.P. & Etsell, T. H. **Recovery of gold from computer circuit board scrap using aqua regia.** Waste Management Res. 25 (4) (2007) 380-383.
28. Vivas, R. C. & Costa, F. P. **Tomada de decisão na escolha do processo de reciclagem e recuperação de metais das placas eletrônicas através da Análise Hierárquica.** IV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Salvador/BA – 25 a 28/11/2013. Disponível em: <http://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2013/III-031.pdf>.
29. Xiu, F-R. & Zhang, F-S. **Materials recovery from waste printed circuit boards by supercritical methanol.** Journal of Hazardous Materials 178 (2010) 628–634.
30. Yamane, L. H.; Moraes, V. T.; Espinosa, D. C. & Tenório, J. A. S. **Recycling of WEEE: characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers.** Waste Management 31 (2011) 2553–2558.
31. Zhang, Z. & Zhang, F-S. **Selective recovery of palladium from waste printed circuit boards by a novel non-acid process.** Journal of Hazardous Materials 279 (2014) 46–51.
32. Zhu, N.; Xiang, Y.; Zhang, T.; Wu, P.; Dang, Z.; Li, P. & Wu, J. **Bioleaching of metal concentrates of waste printed circuit boards by mixed culture of acidophilic bacteria.** Journal of Hazardous Materials 192 (2011) 614–619.
33. Zhou, Y. & Qiu, K. **A new technology for recycling materials from waste printed circuit boards.** Journal of Hazardous Materials 175 (2010) 823–828.