

RECICLAGEM DO LIXO DE INFORMÁTICA: UMA OPORTUNIDADE PARA A QUÍMICA

Annelise Engel Gerbase* e Camila Reis de Oliveira

Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, 91501-970 Porto Alegre – RS, Brasil

Recebido em 9/8/11; aceito em 23/1/12; publicado na web em 30/4/12

RECYCLING OF E-WASTE: AN OPORTUNITY FOR CHEMISTRY. Recycling and sustainable development are increasing in importance around the world. In Brazil, the new National Policy on Solid Wastes has prompted discussion on the future of electronic waste (e-waste). Brazil generates the greatest amount of e-waste among Latin American countries. Nevertheless complete recycling, including end processing of e-waste, does not occur in Brazil. This paper discusses the physical and chemical technologies currently used worldwide and in Brazil for printed circuit board recycling, with emphasis on metal recovery and plastic processing. The goal is to put in evidence the important role that chemistry can play in developing cheaper processes to recycle e-waste.

Keywords: e-waste; recycling; printed circuit board.

INTRODUÇÃO

Vivemos na era tecnológica, com equipamentos a cada dia mais modernos. Hoje computadores são comercializados com telas *Slim* e flexíveis, os monitores de CRT (tubo de raios catódicos) estão sendo substituídos por telas de LCD (tela de cristal líquido), os *notebooks* são leves e menores, a internet *wireless* se espalhou pelo mundo. A evolução dos aparelhos celulares é outro exemplo, atualmente podem ser minúsculos e leves, 10 anos atrás quem diria que estaríamos ganhando celulares gratuitamente nas lojas ou que essas pequenas máquinas seriam capazes de acessar a internet. Assim, também fazem parte desta evolução tecnológica aparelhos de som menores, baterias de longa duração, televisores com alta definição e veículos equipados com aparelho GPS.

Há mais de uma década o uso de dispositivos eletrônicos vem crescendo, havendo uma aceleração na produção destes equipamentos. Antigamente ter um computador em casa era privilégio de poucos, hoje em dia é algo comum, muitas vezes as pessoas têm um computador para uso domiciliar e outro para uso profissional. Inicialmente o acúmulo de lixo eletrônico não representava um problema, porém com o crescimento exponencial deste tipo de equipamento o acúmulo tem sido cada vez maior, não havendo espaço físico apropriado para armazenagem e nem condições adequadas para reciclagem de todo o material descartado.¹

A acelerada obsolescência dos equipamentos eletroeletrônicos tem-se destacado como um problema cada vez mais significativo. Tanto em países desenvolvidos quanto nos em desenvolvimento, o descarte destes materiais representa o tipo de resíduo sólido que mais cresce no mundo.¹

De acordo com o relatório do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA),² atualmente são gerados 40 milhões de toneladas de lixo eletrônico por ano no mundo, principalmente oriundos de países desenvolvidos. Só a União Europeia gera anualmente de 8,3 a 9,1 milhões de toneladas. Além disso, estimativas apontam que a venda de equipamentos eletrônicos deve crescer consideravelmente nos países em desenvolvimento nos próximos 10 anos. Nestes países, a classe média está cada vez mais fortalecida e a estabilidade econômica leva ao aumento da compra de eletroeletrônicos.

Os EUA é o país com maior produção de sucata eletrônica do mundo, acumulando anualmente o montante de 3 milhões de

toneladas. Em 2007, 410 mil toneladas foram recicladas (13,6%) e o restante foi inadequadamente descartado, indo para aterros ou incineradoras.³

A China é o segundo maior produtor de sucata eletroeletrônica do mundo, a geração de resíduos é de aproximadamente 2,3 milhões de toneladas por ano. O acúmulo de lixo na China é ainda maior se forem considerados os alarmantes números de importação de sucata eletrônica. O país recebe 70% de toda a sucata exportada no mundo, o restante é exportado para países como Índia, Nigéria, Paquistão, Malásia, Vietnã.^{2,4-6}

Considerando apenas a sucata oriunda de computadores, os EUA estão em primeiro lugar com uma produção de 474 mil toneladas e a China em torno de 300 mil toneladas. Segue o Brasil que, em 2005, gerou 97 mil toneladas. Na América Latina, o Brasil ocupa a primeira posição como produtor de lixo de informática. Em segundo lugar está o México, com uma produção de 48,0 mil toneladas.^{2,7}

Os Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) (celulares, computadores e afins) são compostos basicamente por materiais poliméricos e metálicos. Apresentam em sua constituição metais pesados e outros componentes, como os retardadores de chama bromados, que ao serem descartados no solo, em aterros ou lixões, podem causar danos graves ao meio ambiente e à saúde das pessoas. Quando o lixo é depositado em aterros não controlados há a possibilidade de ocorrer a lixiviação destes metais para o solo e para as águas subterrâneas e superficiais. A incineração destes materiais também não é aconselhada, pois leva à emissão de poluentes no ar. Por exemplo, a queima de PVC libera toxinas como dioxinas e furanos, que podem afetar o homem alterando suas funções hormonais ou, ainda, contaminando o leite materno.^{1,8-11}

Os metais pesados presentes principalmente nas placas de circuito impresso dos computadores, tais como mercúrio, chumbo, cádmio e arsênico, são altamente tóxicos. A Tabela 1 mostra os principais metais pesados presentes na composição de eletrônicos e os riscos à saúde que podem provocar. O elevado nível de poluição causado por esses tipos de resíduos em alguns países da África, Ásia e América do Sul tem despertado uma crescente preocupação de governos e órgãos ambientais.¹²

A reciclagem é uma opção importante que vem sendo implementada e incentivada por governos, instituições e ONGs. É a alternativa ecologicamente correta para o tratamento da sucata eletrônica. Reciclar o resíduo eletrônico contribui para a preservação do meio ambiente, além de reduzir a extração de recursos naturais não

*e-mail: agerbase@ufrgs.br

Tabela 1. Elementos perigosos encontrados em componentes eletrônicos. Adaptada da ref. 12

Componentes eletrônicos	Componente perigoso	Riscos à saúde
Monitores de computador e televisores	Chumbo	Danos aos sistemas nervoso, circulatório e renal, e dificuldade de aprendizagem em crianças.
Placas de circuitos de impressoras, transmissores e interruptores, baterias de produtos eletrônicos	Mercúrio	Danos permanentes ou fatais ao cérebro e rins.
Interruptores, transmissores e placas de circuito	Arsênio	Danos pequenos à pele, pulmão e câncer linfático; conhecido agente cancerígeno para os seres humanos.
Baterias de equipamentos eletrônicos e cabos, placas de circuito	Cádmio	Danos ao rim, pulmão e câncer de próstata.

renováveis como, por exemplo, o cobre, que pode ser recuperado no processo. No entanto, principalmente em países subdesenvolvidos, a possibilidade de ganhar dinheiro com a comercialização do material desmantelado instiga o interesse de comunidades pobres de realizar o trabalho de desmanche do lixo eletrônico sem cuidado e/ou proteção.

Considerando a diversidade de lixo eletrônico, este trabalho discute os processos tecnológicos físicos e químicos atualmente utilizados, no mundo e no Brasil, para a reciclagem de placas de circuito impresso, com ênfase na recuperação de metais e reutilização do plástico.

COMPOSIÇÃO DE LIXO ELETRÔNICO

O lixo eletroeletrônico (*e-waste*, *eletronic waste*) constitui-se de eletrodomésticos, computadores, rádios, televisores, celulares e outros bens que estejam estragados, obsoletos ou quebrados. Esse lixo é composto, principalmente, de plástico, ferro, metais não ferrosos, vidro e madeira. Na Tabela 2 estão apresentados os tipos de materiais que compõem a sucata de equipamentos eletroeletrônico e suas respectivas quantidades.¹³

Tabela 2. Composição média da sucata de equipamentos eletroeletrônicos. Adaptada da ref. 13

Material	Quantidade
Plásticos	20,6%
Ferro/Aço	47,9%
Metais não ferrosos	12,7%
Vidro	5,4%
Placas de circuito impresso	3,1%
Madeira	2,6%
Outros	7,7%

As placas de circuito impresso estão presentes em praticamente todos os equipamentos da indústria de eletroeletrônicos e são importantes componentes dos computadores. Dentro do gabinete (torre de computador) existe um conjunto de placas de circuito impresso, como a placa mãe, placa de rede, placa de modem e placa de vídeo, que estão presente em praticamente 90% dos computadores. O material que compõe a base, chamada laminado, de uma placa de circuito impresso, pode ter diferentes composições, alguns exemplos são:

fenolite (papelão impregnado com uma resina fenólica), fibra de vidro, composite (mistura de resina fenólica com a fibra de vidro) e cerâmicos. O laminado é recoberto por uma fina camada de cobre, sobre a qual são montados os componentes eletrônicos. As conexões entre os componentes ocorrem do lado recoberto com cobre através de caminhos condutores.¹⁴

Os equipamentos eletrônicos contêm várias frações de materiais valiosos sendo que a maioria destas substâncias está nas placas de circuito impresso. A composição média de uma placa de circuito impresso está descrita na Tabela 3.¹⁵ As quantidades de metais valiosos são significativas considerando-se, por exemplo, que a concentração de ouro existente na PCI é superior à encontrada no minério de ouro bruto. Segundo Veit,¹⁶ há 17 g de ouro por tonelada de resíduo de PCI, enquanto que na mineração de ouro a quantidade extraída varia de 6-12 g por tonelada de minério.

Tabela 3. Composição média de uma placa de circuito impresso. Adaptada da ref. 15

Componentes de uma PCI	Quantidades médias		
	Metais	Valores médios	
Metais	28%	Cu	14%
		Fe	6%
		Ni	2%
		Zn	2%
		Sn	2%
		Ag	0,3%
		Au	0,04%
		Pd	0,02%
Plásticos		19%	
Bromo		4%	
Mat. cerâmicos, vidro e óxidos		49%	

Os monitores de computadores e televisores também são fontes de poluição, pois contêm metais ou compostos nocivos ao meio ambiente.¹⁷ Os tubos de raios catódicos (CRT) ou tubos de imagem utilizados alguns anos atrás tornaram-se obsoletos e estão sendo substituídos por telas de cristal líquido (LCD). O descarte inadequado dos CRT pode ocasionar um grave problema ambiental, pois compostos de chumbo, cádmio, estrôncio, bário, arsênio, antimônio e fósforo estão presentes nesses tubos. Cada CRT possui cerca de 1-4 kg de chumbo por tela, utilizado como proteção contra radiações e para estabilizar o vidro.¹⁸ As telas de LCD possuem compostos de arsênio no vidro e de mercúrio nas lâmpadas fluorescentes que iluminam a tela. Entretanto, as telas com tecnologia LED (Diodo Emissor de Luz), não possuindo lâmpadas com mercúrio, tornam-se ecologicamente mais corretas.¹⁹

RECICLAGEM DO LIXO DE INFORMÁTICA

Etapas iniciais

Usualmente, o processo de reciclagem do lixo de informática inicia com a coleta e/ou recebimento do material obsoleto. Após, os equipamentos passam por uma triagem que irá definir se o computador e/ou monitor está funcionando, aqueles em condições de uso são encaminhados para projetos de inclusão digital de comunidades e escolas.

O computador, ao fim de sua vida útil, é desmontado, os componentes são separados (plásticos, metais, placas de circuito impresso, etc.) e descaracterizados. O volume é reduzido por trituração e/ou compactação (para minimizar os custos de transporte) e, por fim, é encaminhado para a adequada reciclagem.²⁰⁻²² A reciclagem pode ocorrer diretamente nos centros que realizam a separação, se possuem

estrutura para tal atividade, ou em recicladoras especializadas (por exemplo, recicladoras de plástico). Na Figura 1 é possível visualizar o fluxograma do processo inicial de reciclagem.

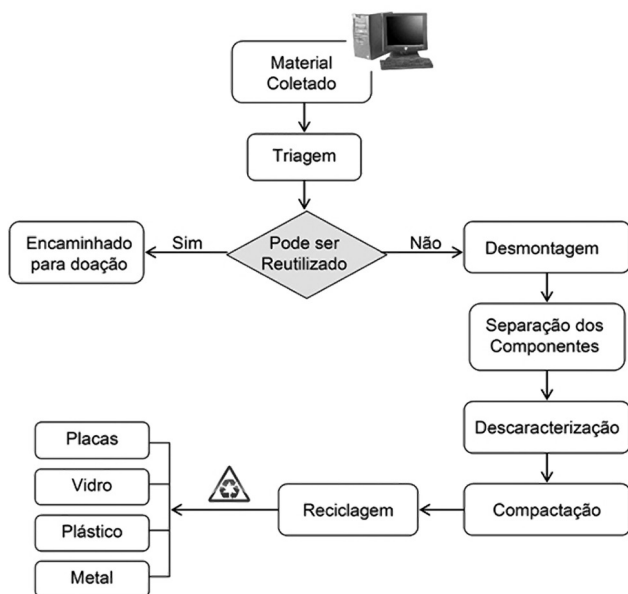


Figura 1. Fluxograma do processo inicial de reciclagem de computadores. Adaptada das refs. 21 e 22

A patente de Jason e Doherty,²³ *Disposal of electrical waste*, apresenta uma metodologia para eliminação de resíduos de equipamento eletrônico. Constitui-se das seguintes etapas: desmantelamento manual (placas de circuito, metais, plásticos e componentes de vidro), tratamento dos materiais plásticos em produtos utilizáveis, separação mecânica dos componentes eletrônicos das placas de circuito impresso, moagem e derretimento do vidro, separação de contaminantes do vidro e um método para fabricação de materiais a partir dos resíduos, para utilização na indústria da construção.

Reciclagem de monitores

Os monitores de computadores e os televisores anteriormente feitos de tubos de raios catódicos (CRT) foram substituídos por telas LCD ou LED. A reciclagem dos monitores CRT obsoletos é difícil devido ao alto teor de contaminantes, principalmente fósforo e chumbo, e à dificuldade de realizar a descontaminação. Sendo assim, são poucas as recicladoras que processam este tipo de monitores.

As partes do gabinete e peças internas são separadas e acondicionadas em recipientes específicos, de acordo com os tipos de materiais. O CRT é composto pelo painel frontal, que contém pó de fósforo (revestimento contendo fósforo e alguns metais pesados como cádmio, zinco e vanádio) aderido ao seu interior e pelo funil de vidro com chumbo, alguns vidros de CRT contêm até 25% de óxido de chumbo (PbO).^{17,20,24} Para separar o painel do funil o método convencional utilizado é um fio aquecido eletricamente em volta da junta que une ambas as partes. No entanto, o processo é demorado e pequenas imperfeições podem ocorrer no processo de separação. Uma nova tecnologia de separação, empregada na fábrica da Panasonic no Japão, utiliza raios laser para separar o painel e o funil, desta forma o processamento do monitor torna-se três vezes mais rápido do que com método anterior.²⁵

O pó de fósforo é aspirado do painel e o vidro limpo é enviado à fundição, tornando-se novamente matéria-prima (para fabricação de tijolos, telhas, materiais cerâmicos, entre outros). O funil de

vidro contendo chumbo pode ir para a fundição de chumbo, que irá utilizar um processo térmico para recuperar o metal. Também, há o processo chamado “vidro para vidro” que se constitui em um circuito fechado de reciclagem de vidros de CRTs, onde o vidro é utilizado como matéria-prima para a confecção de novos monitores CRT.^{9,24,26}

Reciclagem dos plásticos

O material plástico que compõe teclados, *mouses*, monitores e CPUs são resinas termoplásticas, principalmente ABS (copolímero derivado dos três monômeros: acrilonitrila, butadieno e estireno), poliestireno de alto impacto (HIPS) e PVC (policloreto de vinila).²⁷

O maior volume, aproximadamente 26%, do plástico utilizado em aparelhos eletrônicos é o PVC que é um bom isolante térmico e elétrico, resistente a choques e não propaga chamas, no entanto, pela queima pode formar dioxinas (organoclorados carcinogênicos e teratogênicos). O ABS é uma resina que apresenta resistência química, alto brilho e boa relação custo-benefício, porém tem como desvantagens a inflamabilidade e a suscetibilidade à degradação termo e foto-oxidativa.²⁸

Os termoplásticos são plásticos que podem ser transformados, processados e reprocessados. Produtos gerados com a matéria-prima reciclada consomem 70% menos energia do que a produção de plásticos novos. O reaproveitamento pode ser feito através de reciclagem energética, reciclagem química ou reciclagem mecânica.^{29,30}

Na reciclagem energética, os resíduos plásticos são utilizados como combustível na geração de energia elétrica. O calor liberado com a incineração do plástico é similar ao liberado com a queima de óleo combustível (1 kg de plástico libera energia equivalente à queima de 1 kg de óleo combustível).³⁰ Quando o plástico contém poluentes como metais pesados volatilizáveis e/ou halogênios, esse método de reciclagem não deve ser utilizado, pois compostos tóxicos poderão ser liberados na atmosfera. Assim sendo, para resíduos de computadores a incineração não é o método mais indicado, pois como mencionado acima a queima do PVC forma como subprodutos dioxinas e furanos.

Já na reciclagem química, o plástico é reprocessado por aquecimento, sendo obtidos monômeros ou hidrocarbonetos que serão utilizados novamente na indústria petroquímica para a produção de novos plásticos. O custo, para a realização deste tipo de reciclagem, é muito elevado, não sendo atrativo para as empresas. Os principais contaminantes do processo químico são tintas, papéis, colas e gorduras.³⁰ Os processos para a reciclagem química são divididos basicamente em dois tipos: solvólise e termólise.^{31,32}

A reciclagem mecânica é a mais conhecida, principalmente por ter um baixo custo e gerar produtos com boa qualidade. É a técnica mais utilizada no Brasil. O processo consiste em transformar o plástico em grânulos que poderão ser reutilizados para a produção de outros produtos. A estrutura básica do processo de reciclagem passa pelas etapas de separação, moagem, lavagem, secagem, aglutinação e extrusão, apresentado na Figura 2.^{30,32}

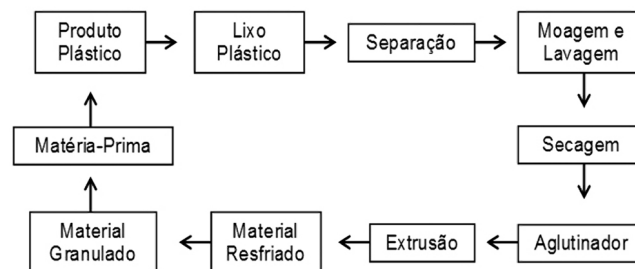


Figura 2. O processo de reciclagem mecânica do plástico. Adaptada da refs. 30 e 31

Na separação é feita a triagem por tipo de plástico; no moinho ocorrerá a etapa de trituração do plástico até obter-se o tamanho desejado; na lavagem o material moído é lavado com água para a retirada de impurezas; na secagem é eliminado o excesso de água. É uma etapa importante, pois alguns polímeros podem sofrer hidrólise na etapa de reprocessamento caso a água não seja retirada. A seguir, na etapa de aglutinação, o material é compactado e são adicionados aditivos, como cargas e pigmentos. Finalmente, no reprocessamento, o material é encaminhado para a extrusora e irá passar por uma matriz, adquirindo assim uma forma pré-determinada.

Kopper³³ é o autor da patente intitulada "Processo de Recuperação de Termoplástico Reciclado" que utiliza tecnologia simplificada, modula e minimiza máquinas e equipamentos para o processamento de lixo termoplástico. Propõe a construção de miniusinas de recuperação do material, melhorando a qualidade final do plástico reciclado para o reprocessamento.

Reciclagem das placas de circuito impresso

O tratamento de uma placa de circuito impresso (PCI) é complexo, assim, várias tecnologias têm sido desenvolvidas ou aprimoradas para a reciclagem deste componente, presente em todos os computadores. Recentemente foram publicados alguns artigos de revisão que abordam tanto a recuperação dos materiais úteis, quanto os impactos ambientais causados.³⁴⁻³⁶ Os processos para reciclagem de uma PCI podem ser mecânicos, químicos ou térmicos. Os principais processos são os mecânicos (cominuição, classificação e separação), pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos, eletrometalúrgicos e biometalúrgicos. Dentre os tratamentos possíveis, o tratamento mecânico é o menos agressivo ao meio ambiente e aos seres humanos por gerar menos resíduos contaminantes.^{15,17}

Processos mecânicos

O processamento mecânico pode ser considerado um pré-tratamento, com o objetivo de separar previamente metais, materiais poliméricos e cerâmicos. Consiste na combinação de um ou mais processos operacionais para o reaproveitamento do material descartado. Após esta etapa, os metais são encaminhados para processos metalúrgicos de refinação.¹⁵ As técnicas que compõem o processo são: cominuição, classificação e separação.^{37,38}

A cominuição é uma técnica mecânica de redução do tamanho das partículas. A fragmentação ocorre com o objetivo de formar de partículas com tamanho e forma determinadas e liberar metais para futura concentração.³⁷ As técnicas utilizadas são impacto, atrito e compressão.³⁹ O processo de fragmentação pode ser subdividido em britagem e moagem. Inicialmente, faz-se a britagem atingindo-se uma granulometria superior a 1 mm. Os equipamentos utilizados são britadores giratórios ou de mandíbula. A moagem é utilizada quando se deseja uma granulometria inferior a 1 mm. No processo de moagem das PCI são utilizados, principalmente, moinhos de martelos (moinho Shredder) e de facas. A cominuição é quase sempre dividida em várias etapas visando obter o tamanho de partícula desejado e assim, minimizando os custos, já que a operação envolve elevado consumo de energia.^{40,41}

A etapa de classificação opera juntamente com o processo de fragmentação. As partículas de material, obtidas pelo processo de cominuição, devem ser separadas ou classificadas de acordo com o seu tamanho. A classificação tem como principal objetivo o conhecimento da distribuição granulométrica das partículas.

Os equipamentos empregados para a classificação do material fragmentado são as peneiras, os classificadores mecânicos e os ciclones.^{40,41} As peneiras podem ser vibratórias, rotativas ou estáticas e são utilizadas para a classificação de partículas mais grosseiras

(acima de 1 mm de diâmetro). Podem operar a seco e a úmido. As partículas com dimensões superiores à da abertura considerada tendem a ficar retidas na superfície e as com dimensões inferiores tendem a atravessar a mesma. Os classificadores mecânicos operam com tamanho de partículas menores que as peneiras (inferior a 1 mm), mas são ineficientes para a separação de partículas muito finas (em média menores que 0,105 mm). Trabalham quase sempre a úmido. Os ciclones operam com tamanhos de partículas inferiores a 1 mm e são muito eficientes para separarem partículas muito finas. Podem operar a seco ou a úmido.

Após as etapas de cominuição e de classificação granulométrica, o enriquecimento do material acontece por meio de técnicas de separação - separam-se as partes que interessam para o processo de refino do metal, descartando-se eventuais impurezas. As operações de separação podem ser, por exemplo, separação gravimétrica, magnética e eletrostática.³⁷

A separação gravimétrica baseia-se na diferença de densidade, utilizando-se de um meio fluido, água ou ar, para realizar a separação. A técnica apresenta bons resultados com baixo custo.⁴¹ Os processos de separação por meio gravimétrico podem ser, por exemplo, por líquidos densos ou jígues. A separação por líquidos densos é o processo mais simples e envolve o uso de líquidos com alta densidade relativa. O material a ser separado é adicionado ao líquido (por exemplo, líquidos orgânicos) com um valor de densidade intermediário ao dos dois componentes que se deseja separar. Os particulados leves (baixa densidade) tendem a flutuar na superfície e os componentes pesados (alta densidade) tendem a afundar.^{38,41}

A jigagem é um processo de concentração mais complexo devido às suas variações hidrodinâmicas. Um fluxo de água é pulsado ou movido por meio de pistões para cima e para baixo, através do leito de material. Como resultado deste movimento oscilatório e da diferença de densidade, ocorre a estratificação do material.^{41,42}

A separação magnética baseia-se nos diferentes graus de atração exercidos por um campo magnético sobre os vários compostos metálicos.⁴² Quando submetidos a um campo magnético, os metais podem ser divididos em 3 grupos: ferromagnéticos (forte atração), paramagnéticos (média e fraca atração) e diamagnéticos (nenhuma atração). Com a técnica é possível separar uma fração magnética (por exemplo, ferro e níquel) e uma fração não magnética. A fração não magnética é encaminhada para um separador eletrostático.³⁸

No método de separação eletrostática a propriedade determinante é a condutividade elétrica, os materiais são classificados em condutores e não condutores de corrente elétrica.³⁷ Quando partículas de polaridade diferentes são colocadas em um campo elétrico, seguem trajetórias diferentes de movimento e podem ser capturadas separadamente.⁴² O funcionamento de um separador eletrostático que atua através da indução de condutividade pode ser explicado considerando a colocação de partículas sólidas em um rotor na presença de campo elétrico. Uma carga induzida irá se desenvolver na superfície das partículas. As partículas condutoras irão assumir o potencial do rotor, oposto ao do eletrodo de descarga, e as forças eletrostáticas das partículas irão atraí-las para o eletrodo. As partículas não condutoras não adquirem a carga do rotor e, por conseguinte, não são atraídas pelo eletrodo, podendo ser separadas das condutoras.³⁸

No caso das placas de circuito impresso, a diferença de condutividade elétrica entre os metais e os não metais é condição fundamental para o bom resultado da técnica. É possível separar os materiais não condutores (polímeros e materiais cerâmicos) dos condutores (metais como Cu, Pb, Sn, entre outros).

Veit³⁸ estudou um processo de tratamento mecânico para placas de circuito impresso iniciando pela cominuição das placas, o material triturado em 3 diferentes faixas granulométricas ($F < 0,25$ mm, $0,25 < F < 0,5$ mm, $0,5 < F < 1,0$ mm). Após, realizou separação por

diferença de densidade utilizando uma solução de tetrabromoetano (densidade de $2,96 \text{ g/cm}^3$) diluído com acetona na proporção 1:0,27. O objetivo da diluição foi reduzir a densidade para $2,5 \text{ g/cm}^3$ e baixar a viscosidade, tornando o processo de separação mais rápido. Após 2 h a separação estava completa, obtendo-se frações pesadas (ricas em metais) e frações leves (ricas em plásticos e cerâmicos) nas três diferentes granulometrias. As amostras foram analisadas quimicamente, comprovando que os principais metais estavam concentrados nas frações pesadas. Com esta metodologia foi possível concentrar cerca 35% dos metais, presentes nas placas, somente com a cominuição e classificação granulométrica. Com a separação por densidade obteve-se na fração afundada uma concentração de mais de 80% de metais, sendo que destes aproximadamente 65% eram cobre. Realizando alguns cálculos, os pesquisadores concluíram que para cada 100 kg de PCI era possível obter 16,4 kg de metal, sendo que 8,3 kg eram cobre.

Veit⁴³ estudou também outra rota mecânica para recuperação de cobre em placas de circuito impresso, Figura 3. Desta vez utilizou cominuição, classificação granulométrica, separação magnética, separação eletrostática e, por fim, eletro-obtenção para recuperar cobre. As PCI sofreram cominuição em moinho de facas para se obter tamanhos inferiores a 1 mm, seguida por uma separação granulométrica (mesmas frações anteriores). O material foi colocado em um separador magnético por via seca, com um campo magnético de 6000 a 6500 Gauss. Duas frações foram separadas, uma magnética contendo principalmente Fe e Ni e outra não magnética contendo os metais restantes, polímeros e materiais cerâmicos. A fração não magnética foi encaminhada para um separador eletrostático a fim de se separar os materiais condutores dos não condutores, sendo os produtos obtidos analisados quimicamente por espectroscopia de absorção atômica para determinar a quantidade de metais presentes. A eletro-obtenção foi realizada com as duas soluções da fração de maior granulometria das PCI, uma dissolvida em ácido sulfúrico e outra em água-régia. A célula utilizada era composta por uma placa de cobre como cátodo e uma placa de platina como ânodo, onde foi aplicado um potencial de 400 mV. Neste trabalho Veit concluiu que nas etapas iniciais (cominuição e classificação granulométrica) houve dificuldade de fragmentação das PCI e que os metais tendem a se concentrar nas frações mais grosseiras; a fração magnética existente é muito pequena (de 9 kg de sucata tratadas somente 230 g foram separadas, porém com elevado teor de Fe, cerca de 42%); as frações de PCI separadas eletrostaticamente apresentaram em média 50% de cobre, 25% de estanho e 7% de chumbo; a eletro-obtenção possibilitou recuperar cobre, sendo o principal elemento depositado, com um rendimento superior a 97%.

Xu *et al.*⁴⁴ também utilizaram o processo mecânico para reciclagem das PCI. Na etapa de cominuição foi utilizado, inicialmente,

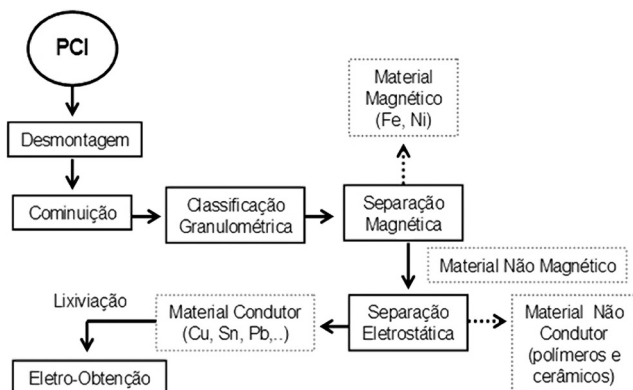


Figura 3. Processo mecânico de reciclagem de PCI utilizado por Veit. Adaptada da ref. 16

um britador e após o material foi encaminhado para um moinho de martelos. A separação granulométrica ocorreu com o uso de peneiras para se obter granulometrias inferiores a 1,2 mm. O material foi encaminhado para um separador eletrostático, objetivando obter uma fração com metais e outra com não metais. As amostras com tamanho entre 1,2 e 0,6 mm apresentaram melhor separação. Este estudo concluiu que cerca de 70% da composição das PCI são materiais não metálicos. Objetivando a correta disposição desta sucata não metálica, foram adicionados alguns aditivos ao material não metálico e, em seguida, o mesmo foi prensado a quente. As placas compostas com aproximadamente 80% em massa de materiais não metálicos podem ser utilizadas como material para construção (telhas, divisórias, placas de isolamento, etc.).

Pirometalurgia

É um processo metalúrgico que utiliza altas temperaturas, podendo produzir metais puros, ligas ou compostos intermediários. A pirometalurgia requer elevado consumo de energia para atingir as temperaturas adequadas para cada etapa do processo. Essa energia, normalmente, é fornecida pela queima de combustíveis fósseis, por reações exotérmicas que ocorrem nas diferentes etapas ou aquecimento elétrico. Um processo pirometalúrgico é constituído de uma série de etapas que vão desde a secagem da matéria-prima até o refino do produto final. A etapa de transformação química a ser utilizada vai depender do material de partida. As mais conhecidas são calcinação (decomposição pelo calor na presença de oxigênio), ustulação (calcinação aplicada a sulfetos) e pirólise (decomposição pela ação do calor em um ambiente com pouco ou nenhum oxigênio). Um dos maiores problemas da utilização de processos pirometalúrgicos é a possibilidade de emissão de compostos tóxicos como, por exemplo, as dioxinas liberadas pela queima dos polímeros clorados.⁴⁵

Em 2008, Jie *et al.*⁴⁶ estudaram a pirólise como uma alternativa de reciclagem de placas de circuito impresso. Durante o processo de pirólise, a parte orgânica foi decomposta em piro-óleos e piro-gases. A pirólise foi realizada em um reator acoplado a um forno tubular, sob atmosfera de nitrogênio. A amostra foi aquecida a uma taxa de $10 \text{ }^\circ\text{C/min}$ até alcançar a temperatura desejada e depois foi mantida na mesma temperatura por 30 min, os testes realizados ocorreram a 300, 400, 500, 600 e $700 \text{ }^\circ\text{C}$. O vapor condensado ficou armazenado em um copo na temperatura de gelo/água e o não condensado foi coletado separadamente. O principal objetivo do experimento foi determinar a composição dos efluentes produzidos no reator da pirólise. A fase sólida, 75-80%, obtida após a pirólise, consistiu principalmente de fibra de vidro, metais e carbono. O líquido obtido durante o processo de pirólise, cerca de 9% em massa, era constituído de uma mistura de compostos orgânicos aromáticos e oxigenados (geralmente denominado óleos). A fase gasosa, 13% em massa, era composta principalmente de hidrocarbonetos leves C4-C1 e CO, CO₂, H₂ e O₂ e poderia servir de gás para fins energéticos, uma vez que seu poder calorífico foi de aproximadamente 70 MJ/kg.

Lucze,⁴⁷ autor da patente *Pyrolytic Apparatus and Method*, apresentou um aparelho que possibilita a condensação do piro-óleo a partir do piro-gás. Pelo menos uma parte do gás, depois de passar através da unidade de condensação, é recirculado para a área da unidade de pirólise do reator.

Hidrometalurgia

O processo hidrometalúrgico consiste na separação de metais, sendo que a etapa principal envolve reações de dissolução do material em soluções lixiviantes, ácidas ou alcalinas, seguida de etapas de separação como filtração, destilação e precipitação dos metais dissolvidos. Algumas das vantagens deste método, em relação à pirometalurgia, são a economia de energia e a menor poluição do meio ambiente.^{15,38}

Martins⁴⁸ extraiu estanho e cobre das placas de circuito impresso através de lixiviação e recuperou as espécies através de precipitação por neutralização do licor de lixiviação. As PCI foram previamente desmontadas, fragmentadas em moinhos de cilindros e peneiradas, obtendo-se um produto com granulometria inferior a 0,208 mm. O material foi lixiviado com soluções aquosas 2,18N de H₂SO₄, 2,18N H₂SO₄+3,0N HCl, 3,0N HCl e 3,0N HCl+1,0N HNO₃ a uma temperatura de 60 °C com agitação intensa. O resíduo sólido das etapas de lixiviação foi recolhido por centrifugação, seco em estufa a 60 °C por 24 h e pesado. Os precipitados ricos em Cu e Sn, obtidos através da neutralização dos licores de lixiviação com NaOH, foram recolhidos por centrifugação, secos em estufa, pesados e encaminhados para caracterização. A lixiviação com água-régia, 3,0N HCl + 1,0N HNO₃, apresentou os melhores resultados de extração para Sn e Cu, respectivamente 98 e 93%, enquanto que os piores resultados foram para o sistema 2,18N H₂SO₄ (Sn 2,7% e Cu <0,01%).

Sheng *et al.*⁴⁹ separaram os chips da placa de circuito impresso (placa de fibra de vidro) com uma solução com uma parte de HNO₃ concentrado e duas partes de água, a 70 °C por 1 h. Sob estas condições os metais base (cobre, ferro, níquel, estanho, chumbo, alumínio e zinco) foram dissolvidos. Após a primeira lixiviação, os chips e a resina foram triturados mecanicamente e uma nova lixiviação, nas mesmas condições anteriores, solubilizou os metais base remanescentes. Após, foi realizada a lixiviação dos resíduos da segunda fase com água-régia (mistura com proporção 3:1 de HCl concentrado e HNO₃ concentrado), para dissolver o ouro metálico (Au⁰ oxidado a Au³⁺). A quantidade de solução necessária para a imersão de chips de computadores foi de aproximadamente 2 mL/g de chips de computador. O ouro foi precipitado com sulfato ferroso.

Semelhantemente ao trabalho de Sheng, Barrientos *et al.*⁵⁰ propuseram a recuperação hidrometalúrgica de ouro e prata em sucata de jóias. Inicialmente as amostras foram lixiviadas com HNO₃ para extrair a prata e, depois, uma lixiviação com água-régia solubilizou o ouro presente no material. Com a calcinação do AgCl, obtido pela adição de NaCl ao licor de HNO₃, foi extraído um teor de 94% de Ag, sendo que os principais contaminantes foram o Au e o Sn com teores de 2%, aproximadamente. A precipitação do ouro com FeSO₄ possibilitou a recuperação de 98,7% de Au, sendo que a prata foi a impureza de maior teor (0,72%). Foi salientada a importância de aplicação deste método quando o material apresenta um teor de prata inferior a 10%, como é o caso das PCI, pois com altos teores pode ocorrer a formação de uma camada de AgCl sobre a sucata, dificultando a dissolução do ouro com a água-régia.

A patente de Kogan,⁵¹ *Process for the Recovery of Precious Metals from Electronic Scrap by Means of Hydrometallurgical Technique*, descreve um processo hidrometalúrgico para a extração de metais preciosos, provenientes de lixo eletrônico ou minerais. O material triturado reage com um ácido halogenado concentrado contendo um sal halogenado de magnésio.

Eletrometalurgia

Eletrometalurgia é o processo de refino de metais através da eletrólise.^{34,35} O princípio envolve as reações de oxirredução, não espontâneas, em que o metal presente em um material se dissolve sob a forma de íons metálicos e é eletrodepositado no cátodo na forma pura.^{52,53} Praticamente, todo o cobre obtido a partir do minério de cobre é refinado eletroliticamente. Dois processos eletrometalúrgicos podem ser seguidos, o eletrorefino e a eletro-obtenção.

O processo de eletrorefino é utilizado, normalmente, com metais fundidos obtidos por métodos pirometalúrgicos. O ânodo é constituído pelo metal fundido, ainda contendo certas impurezas (ânodo com 99,95% de Cu). Durante a eletrólise, o metal, sem a impureza do anodo, é eletrodepositado no cátodo.¹⁶

Os metais remanescentes no ânodo (Ag, Au, Pt, Pb, Sn, etc.) podem se dissolver no eletrólito ou formar lodos que se acumulam no fundo da célula eletrolítica. O material é recolhido periodicamente e enviado para uma fábrica de derivados de Cu ou unidades de recuperação de metais.⁵⁴

A eletro-obtenção consiste na eletrólise (com ânodo insolúvel, inerte) de uma solução aquosa de um sal de metal (sulfato, cloreto, etc), obtida por extração do solvente ou lixiviação do minério ou concentrado. A solução do íon metálico é submetida a uma corrente elétrica e ocorre eletrodeposição do metal no cátodo. Há uma tendência a utilizar o lixiviado, contendo metais dissolvidos, obtido do tratamento hidrometalúrgico. Na eletro-obtenção, metais como cobre, zinco, cádmio, alumínio, metais preciosos, entre outros, podem ser obtidos.

De acordo com Biswas *et al.*,⁵⁴ no processo de eletro-obtenção do cobre utiliza-se como anodo inerte uma liga de Pb-Sn-Ca e o eletrólito é uma solução aquosa contendo o íon metálico. Os produtos obtidos são cobre puro no cátodo e gás oxigênio no ânodo. Elingham cita em seu trabalho que numa planta de eletrorefino de cobre é possível obter cobre com 99,98% de pureza.

Um processo de reciclagem de placas de circuito impresso utilizando o processo de eletrorefino está descrito na patente dos inventores James *et al.*,⁵⁵ *System for Recycling Printed Circuit Boards*. Inicialmente as placas de circuito impresso passam pelo processo de pirólise e depois é feita uma “pasta” do resíduo metálico para compor o eletrodo. A pasta é composta pela combinação de metais pulverizados, pó de carbono e um líquido iônico.

Biometalurgia

A biometalurgia utiliza as interações entre os micro-organismos e minerais para recuperar metais valiosos. Com base nos processos biológicos tem sido possível recuperar, por exemplo, cobre, ouro e cobalto. A principal aplicação da biometalurgia tem sido a biolixiviação de sulfetos metálicos. As principais vantagens da técnica são os baixos custos, quando comparados aos de uma fundição, e a simplicidade.⁵⁶ Como desvantagem possível pode-se citar o tempo requerido para a ocorrência da biolixiviação e a necessidade do metal estar em uma forma que fique exposto para o possível ataque microbiano.³⁶

Brandl *et al.*⁵⁷ aplicaram processos microbiológicos para a lixiviação de metais a partir do lixo eletrônico. Bactérias (*Thiobacillus thiooxidans* e *T. ferrooxidans*) e fungos (*Aspergillus niger*, *Penicillium simplicissimum*) foram cultivados na presença de sucata eletrônica. A adição de quantidades elevadas de resíduos eletrônicos levou ao aumento do pH inicial (devido à alcalinidade dos resíduos). A fim de reduzir os efeitos tóxicos sobre os micro-organismos, o processo foi dividido em duas etapas: os organismos foram cultivados na ausência de sucata eletrônica e, a sucata eletrônica foi adicionada, em diferentes concentrações, aos micro-organismos formados para solubilização de metais. Em concentrações de sucata de 5 e 10 g/L, as bactérias lixiviaram mais de 90% de Al, Cu, Ni e Zn. As duas linhagens de fungos mobilizaram 65% de Cu e Sn, e mais de 95% de Al, Ni, Pb e Zn.

CONCLUSÃO

As diferenças na gestão do lixo eletrônico entre os países desenvolvidos e os emergentes são visíveis. Países da África, Ásia e América Central e do Sul não possuem estratégias e tecnologias para o recolhimento e tratamento do lixo eletrônico. No Brasil são poucas as empresas especializadas na reciclagem de equipamentos eletrônicos e a completa reciclagem do lixo eletrônico ainda não ocorre no país. As placas de circuito impresso são trituradas e exportadas para outros países, tais como Canadá, Bélgica e Cingapura. O refino

dos metais não é feito no Brasil, pois necessita alto investimento financeiro e uma grande quantidade de sucata para se tornar economicamente viável. Dos diversos processos e tecnologias utilizadas no tratamento do lixo de informática, a parte mais complexa e cara é a recuperação dos metais presentes nas placas de circuito impresso, pois envolve processos metalúrgicos que demandam uma elevada quantidade de energia. Portanto, os processos mecânicos, que são mais baratos que os processos metalúrgicos, utilizam equipamentos mais simples e de mais fácil operação, são os realizados no Brasil. Através do processamento mecânico pode-se obter um concentrado de metais que ultrapassa os teores de metais presentes nos respectivos minérios. Por exemplo, após as etapas de cominuição e classificação granulométrica das PCIs obtém-se uma fração de concentrado com cerca de 24% de cobre, enquanto que no minério o valor varia de 1 a 3% de cobre. Obtido o concentrado de metais este pode, então, ser vendido para uma metalúrgica para o devido refino.

REFERÊNCIAS

- Oliveira, R. S.; Gomes, E. S.; Afonso, J. C.; *Química Nova na Escola* **2010**, 32, 240.
- http://www.unep.org/PDF/PressReleases/EWaste_publication_screen_FINALVERSION-sml.pdf, acessada em Abril 2012.
- Silveira, G. T. R.; Chang, S. Y.; *Waste Manage.* **2010**, 30, 2278.
- Robinson, B. H.; *Sci. Total Environ.* **2009**, 408, 183.
- <http://www.drbattery.com/download/Recycle.pdf>, acessada em Abril 2012.
- <http://amath.colorado.edu/computing/Recycling/EWaste.pdf>, acessada em Abril 2012.
- Ongondo, F. O.; Williams, I. D.; Cherrett, T. J.; *Waste Manage.* **2011**, 31, 714.
- http://www.fiec.org.br/iel/bolsaderesiduos/Artigos/Artigo_Equi_Elet_elet.pdf, acessada em Abril 2012.
- Cui, J.; Forssberg, E.; *J. Hazard. Mater.* **2003**, 99, 243.
- Bernardes, I. P.; *Dissertação de Mestrado*, Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2009.
- <http://www.inresiduos.pt/politicasambiente/Residuos/dossiers/Paginas/default.aspx>, acessada em Abril 2012.
- <http://library.thinkquest.org/06aug/02218/index.htm>, acessada em Abril 2012.
- <http://www.environ.ie/en/Publications/Environment/Waste/WEEE/FileDownload,1342,en.pdf>, acessada em Abril 2012.
- Oliveira, L. H.; Silveira, M. A.; *XII Simpósio de Administração da Produção, Logística e Operações Internacionais*, São Paulo, Brasil, 2009.
- Veit, H. M.; *VII Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental*, Porto Alegre, Brasil, 2010.
- Veit, H. M.; *Tese de Doutorado*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 2005.
- <http://www.ativareciclagem.com.br/monitores.htm>, acessada em Abril 2012.
- Menad, N.; *Resour. Conserv. Recycl.* **1999**, 26, 143.
- <http://www.apple.com/br/hotnews/agreenerapple/>, acessada em Abril 2012.
- Cândido, F. E.; Silva, C. W.; *Monografia*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
- Kang, H.; Schoenung, J. M.; *Resour. Conserv. Recycl.* **2005**, 45, 368.
- http://www.cce.usp.br/files/Informacao_03.pdf, acessada em Abril 2012.
- Barker, J. R.; Doherty, F. J.; *UK Pat. GB2,398,298* **2004**.
- http://pages.uoregon.edu/recycle/PDFdocuments/g2g_final.pdf, acessada em Abril 2012.
- <http://www.eletronica.com/reciclagem-de-tubos-de-tv-atraves-de-laser>, acessada em Abril 2012.
- Mostaghel, S.; Samuelsson, C.; *Waste Manage.* **2010**, 30, 140.
- <http://www.e-waste.ch/>, acessada em Abril 2012.
- <http://emc5707.barra.prof.ufsc.br/Microsoft%20PowerPoint%20-%20ABS.pdf>, acessada em Abril 2012.
- Kipper, L. M.; *Tese de Doutorado*, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 2005.
- http://ambientes.ambientebrasil.com.br/residuos/reciclagem/reciclagem_de_plastico.html, acessada em Abril 2012.
- Schwantes, D.; *Tese de Doutorado*, Universidade Federal de São Carlos, Brasil, 2006.
- Spinacé, M. A. da S.; De Paoli, M. A.; *Quim. Nova* **2005**, 28, 65.
- Kopper, E.; *Br PI 9.501.056-4* **1997**.
- Yamane, L. H.; Moraes, V. T.; Espinosa, D. C. R.; Tenório, J. A. S.; *Waste Manage.* **2011**, 31, 2553.
- Duan, H.; Hou, K.; Li, J.; Zhu, X.; *J. Environ. Manage.* **2011**, 92, 392.
- Guo, J.; Xu, Z.; *J. Hazard. Mater.* **2009**, 168, 567.
- <http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2004-182-00.pdf>, acessada em Abril 2012.
- Veit, H. M.; *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 2001.
- Yovanovic, A. P.; *Engenharia da Cominuição e Moagem em Moinhos Tubulares*, Yovanovic, A. P.: Belo Horizonte, 2006, cap. 1.
- <http://www.mib.eng.br/arquivos/pdf/capitulodois.pdf>, acessada em Abril 2012.
- http://www.pormin.gov.br/biblioteca/arquivo/beneficiamento_de_minerio.pdf, acessada em Abril 2012.
- <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/383742/mineral-processing/81313/Gravity-separation>, acessada em Abril 2012.
- Veit, H. M.; Bernardes, A. M.; Bertuol, D. A.; Oliveira, C. T.; *REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto* **2008**, 61, 159.
- Li, J.; Lu, H.; Guo, J.; Xu, Z.; Zhou, Y.; *Environ. Sci. Technol.* **2007**, 41, 1995.
- De Marco, I.; Caballero, B. M.; Chomôn, M. J.; Laresgoiti, M. F.; Torres, A.; Fernández, G.; Arnaiz, S.; *J. Anal. Appl. Pyrolysis* **2008**, 82, 179.
- Jie, G.; Shun, L. Y.; Xi, L. M.; *Anal. Appl. Pyrolysis* **2008**, 83, 185.
- Lucze, S.; *WO 2,009,130,524(A1)* **2009**.
- Martins, A. H.; *Estudos tecnológicos* **2007**, 3, 124.
- Sheng, P. P.; Etsell, T. H.; *Waste Manage. Res.* **2007**, 25, 380.
- Barrientos, C. E.; Martins, A. H.; *REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto* **2010**, 63, 315.
- Kogan, V.; *WO 2,006,013,568(A2)* **2006**.
- Schweickardt, A. R.; *Tese de Doutorado*, Universidade de Brasília, Brasil, 2006.
- Ellingham, H. J. T.; Moore, S.; *J. Inst. Elect. Eng.* **2010**, 69, 185.
- Biswas, A. K.; Davenport, W. G.; King, M.; Schlesinger, M.; *Extractive Metallurgy of Copper*, 4th ed., Pergamon Press: Oxford, 2002.
- Dills, J. C.; Halling, D. B.; Wilkes, J. S.; Trott, S.; *US pat. 20,090,288,956* **2009**.
- Morin, D.; Lips, A.; Pinches, T.; Huisman, J.; Frias, C.; Norberg, A.; Forssberg, E.; *Hydrometallurgy* **2006**, 83, 69.
- Brandl, H.; Bosshard, R.; Wegmann, M.; *Hydrometallurgy* **2001**, 59, 319.