

Reciclagem de Placas de Circuito Impresso para Extração de Cobre: Uma Revisão dos Métodos Utilizados

Recycling of Printed Circuit Boards for Cooper Extraction: a Review of the Methods Employed

Camila Ferreira Pinto,^a  Ana Claudia Granato Malpass,^a  Geoffroy Roger Pointer Malpass^{a,*} 

^aUniversidade Federal do Triângulo Mineiro, Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas, Av. Dr. Randolpho Borges Júnior, 1400, Univerdecidade, CEP 38064-200, Uberaba-MG, Brasil

*E-mail: geoffroy.malpass@uftm.edu.br

Recebido: 12 de Setembro de 2023

Aceito: 11 de Março de 2024

Publicado online: 25 de Março de 2024

The accelerated pace of technological innovations, the frequency of replacement of electrical and electronic equipment and the consequent decrease in the useful life of these devices have caused the generation of electronic waste in the world to increase significantly in recent years, with a projection of continuous and accelerated growth until 2030. In addition, statistics show that the formal recycling rate does not keep up with this growing waste stream, and most electronic waste is being disposed of incorrectly or directed to conventional treatment in landfills and incineration, posing a serious danger to the environment. Waste printed circuit boards are an economically attractive urban mining source for recycling due to their high content of common and precious metals (copper being the most abundant metal) often higher than their respective primary resources. Thus, this review article aims to provide a comprehensive analysis of the situation of electronic waste in the world, the main processes used for recycling waste printed circuit boards, including pyrometallurgy, hydrometallurgy, and biohydrometallurgy, their advantages, disadvantages, and the challenges to achieve a cleaner recycling process that promotes a high recovery rate of metals with less environmental impact.

Keywords: Electronic waste; printed circuit boards; formal recycling; copper recovery; hydrometallurgy.

1. Introdução

Lixo eletrônico é qualquer tipo de equipamento eletroeletrônico (EEE) não funcional, quebrado ou descartado, como resíduo, sem a intenção de reciclar.^{1,2} No entanto, este lixo descartado de forma inadequada gera riscos ambientais visto que contém metais tóxicos e materiais perigosos e também, se perdem recursos valiosos pois os equipamentos eletrônicos podem ser uma fonte polimetálica secundária muito importante.^{3,4}

De acordo com o último Relatório Global *e-Waste*,² em 2019, o mundo gerou 53,6 milhões de toneladas de lixo eletrônico, uma média de 7,3 kg por pessoa. O início do monitoramento global por estes relatórios foi em 2014, quando foram gerados 44,4 milhões de toneladas, ou seja, a geração global cresceu 9,2 milhões de toneladas em apenas 5 anos, e está projetada para alcançar 74,7 milhões de toneladas até 2030, quase duplicando em apenas 16 anos. Além disso, apenas 17,4% do total de lixo gerado foi corretamente coletado, documentado e reciclado.² Estes dados evidenciam que as atividades de reciclagem não acompanham o crescimento global de lixo eletrônico produzido, representando um grave problema em todo o mundo.³

O lixo eletrônico tem várias classificações, entre elas destaca-se a placa de circuito impresso (PCI), que é o componente principal de qualquer equipamento eletrônico.^{3,5} Estão presentes em geladeiras, máquinas de lavar, TV, computadores, telefones celulares, CD/DVD players, rádios, câmeras, entre outros.^{3,6} Assim, com o ritmo acelerado das inovações e a frequência de substituição desses equipamentos, as PCI tornaram-se um dos resíduos que mais crescem no mundo.⁷

As PCIs possuem alta concentração de metais como cobre, zinco, níquel, chumbo, arsênio, mercúrio, cromo, cádmio, paládio, ouro e prata, sendo o cobre o metal mais abundante, como também contêm diferentes elementos perigosos e componentes químicos complexos, como retardadores de chama bromados (BFR) e clorofluorcarbonetos (CFC).^{1,8} Assim, os resíduos de PCI são uma fonte de mineração urbana economicamente atraente para reciclagem, devido ao alto teor de metais, muitas vezes maior do que em seus respectivos recursos primários, que são os minérios destinados à metalurgia.² Além disso, quando essas placas não são recicladas

de maneira ambientalmente correta, representam um grave perigo para o ecossistema durante o tratamento convencional em aterros e com incineração.⁴

Logo, para a sustentabilidade em longo prazo é necessário o estudo de novas tecnologias de reciclagem de resíduos de PCIs, que considerem sua complexidade e heterogeneidade, já que possuem uma composição pouco estável, pois a concentração de metais varia entre uma placa e outra, em função do tipo de aparelho eletroeletrônico.⁵ Além disso, a presença de plásticos, cerâmicas e numerosos elementos metálicos leva a dificuldade na liberação e separação de cada fração, como também deixa o processo de recuperação muito complexo, principalmente quando estão presentes em concentrações muito baixas.⁴

O objetivo desse artigo é fornecer uma revisão abrangente sobre a situação do lixo eletrônico no mundo, os principais processos utilizados para a reciclagem de resíduos de PCI, suas vantagens, desvantagens, e os desafios para alcançar um processo de reciclagem mais limpo e que promova grande recuperação dos valores metálicos presentes nesses resíduos.

2. Lixo Eletrônico

Os equipamentos eletroeletrônicos (EEE) tornaram-se uma parte essencial do cotidiano.² O número de produtos eletroeletrônicos por pessoa aumentou várias vezes nas últimas décadas, em conjunto com a queda do preço dos produtos mais novos. Isso em razão do intenso avanço tecnológico, das maiores demandas por equipamentos eletroeletrônicos, do desenvolvimento econômico da sociedade e do crescimento das indústrias eletrônicas. Ao mesmo tempo a vida útil média dos produtos eletroeletrônicos também foi intensamente reduzida, resultando na geração massiva desses produtos em fim de vida, popularmente conhecidos como lixo eletrônico

(*e-waste*).^{3,4} No entanto, a forma como esses equipamentos são produzidos, consumidos e descartados, como lixo eletrônico, é insustentável, do ponto de vista ambiental.²

Com os níveis crescentes de lixo eletrônico, com as baixas taxas de coleta e se esse lixo não for descartado ou recuperado adequadamente, com tratamentos corretos esse fluxo de resíduos representará risco significativo para o ambiente e para a saúde humana.^{1,2,8} Por isso, pesquisas sobre reutilização de recursos, descarte seguro de metais provenientes do lixo eletrônico, reciclagem de materiais metálicos e não metálicos são necessários e de grande importância do ponto de vista econômico e da proteção ambiental.^{3,8}

O lixo eletrônico é considerado uma “Mina Urbana”, pois contém vários materiais preciosos e metais comuns que podem ser reciclados e reutilizados, e podem oferecer oportunidades para mineração urbana e criação de empregos.^{2,3} Além disso, a quantidade de cobre presente nesses resíduos é cerca de 40 vezes maior do que a quantidade presente em seus minérios naturais.³ Assim, esses resíduos podem servir como recursos secundários para recuperação metálica com baixo custo de operação.¹

O valor dos materiais metálicos presentes no lixo eletrônico global gerado em 2019 é de, aproximadamente, 57 bilhões de dólares. Sendo que, as contribuições principais para esse valor são pelo ferro, cobre e ouro. Com a taxa de 17,4% de coleta e reciclagem documentada, um valor de 10 bilhões de dólares de matéria-prima é recuperado de forma ambientalmente saudável, e 4 milhões de toneladas de matérias-primas podem ser disponibilizadas para reciclagem.²

Existem cerca de 54 categorias diferentes de lixo eletrônico que podem ser agrupadas em seis classes gerais diferentes, como apresentado na Tabela 1. São classificadas com base na similaridade funcional, composição do material, peso médio e seus atributos de obsolescência.²

Dessas 6 classes em que o lixo eletrônico é dividido, a classe de equipamentos pequenos (5) contribuiu com

Tabela 1. Divisão do lixo eletrônico em seis classes gerais

Classes Gerais	Alguns exemplos
1. Equipamentos de troca de calor	Refrigeradores, freezers, ar-condicionado, aquecedores e bombas de calor.
2. Telas e monitores	Televisões, monitores, notebooks, laptops e tablets.
3. Lâmpadas	Lâmpadas fluorescentes, lâmpadas de descarga de alta intensidade e lâmpadas de LED.
4. Equipamentos grandes	Lava-louças, lavadoras e secadoras de roupa, fogões elétricos grandes, equipamentos de impressão e cópia, e painéis fotovoltaicos.
5. Equipamentos pequenos	Aspiradores de pó, micro-ondas, ventiladores, torradeiras, chaleiras elétricas, barbeadores, balanças, calculadoras, aparelhos de rádio, câmeras de vídeo, brinquedos elétricos e eletrônicos, ferramentas, dispositivos de monitoramento e instrumentos de controle médicos.
6. Equipamentos de telecomunicação e pequenos eletrônicos	Telefones celulares, aparelhos de GPS, calculadoras de bolso, roteadores, computadores pessoais, impressoras e telefones.

17,4 milhões de toneladas, seguido por equipamentos grandes (4) (13,1 milhões de toneladas) e equipamentos de troca de calor (1) (10,8 milhões de toneladas). As principais razões para esse aumento do lixo eletrônico são: a rivalidade no mercado de eletrônicos, os avanços científicos, a expansão da tecnologia, a vida útil diminuída e o mercado para dispositivos elétricos e eletrônicos mais baratos.^{1,2}

Para o gerenciamento adequado de resíduos eletrônicos, existem responsabilidades direcionadas aos produtores de EEE, que incluem: a rotulagem adequada dos materiais para auxiliar na reciclagem, o controle dos constituintes tóxicos nos produtos, a utilização de matérias-primas verdes/recicláveis na produção, a redução da quantidade de resíduos no produto, a criação de programas de devolução, entre outros. Assim como, existem as responsabilidades atribuídas aos governantes, como: a implementação de legislações e leis, a criação de regulamentos rígidos contra o despejo ilegal de lixo eletrônico, a elaboração de pesadas multas às indústrias que não seguirem à legislação e o incentivo à conscientização realizado pelas organizações não-governamentais (ONG).³

O monitoramento da quantidade e do fluxo de lixo eletrônico mundial é essencial para avaliar o desenvolvimento ao longo do tempo e assim definir metas para alcançar uma sociedade sustentável e uma economia circular próspera.² Para isso, a Universidade das Nações Unidas (UNU), a União Internacional de Telecomunicações (ITU) e a Associação Internacional de Resíduos Sólidos (ISWA), em colaboração com o Programa das Nações Unidas para o meio ambiente (PNUMA), se uniram na Parceria Global de Estatísticas de Lixo Eletrônico (GESPE) e elaboram os Relatórios Globais de Lixo Eletrônico. Em 2019, foi publicada a terceira edição do “*The Global E-waste Monitor*”, após a primeira e segunda edições em 2014 e 2017, respectivamente. A quarta edição está prevista para ser lançada em 2023.

Para fazer uma análise do crescimento do lixo eletrônico ao longo de um período maior, foram reunidos dados fornecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU) nos anos de 1992, 2002 e 2016. Assim, de acordo com esses dados, foram gerados 14 milhões de toneladas em 1992, passaram para 24 milhões de toneladas em 2002, e mais que triplicaram, para 48,2 milhões de toneladas em 2016.^{2,3,5} A Figura 1 relaciona esses dados e é possível avaliar o crescimento linear e contínuo do lixo eletrônico, desde 1992 até a projeção para 2030.

Além disso, o Relatório Global do Lixo Eletrônico, evidencia que a quantidade formal coletada, documentada e reciclada, em 2019, foi de 9,3 milhões de toneladas, ou seja, representa apenas 17,4% do total de lixo eletrônico gerado, como mostrado na Figura 2. Enquanto, em relação ao ano de 2014, que foram registrados 7,5 milhões de toneladas de lixo eletrônico coletado e reciclado de maneira formal, houve um crescimento de 1,8 milhões de toneladas, apresentando um crescimento da reciclagem

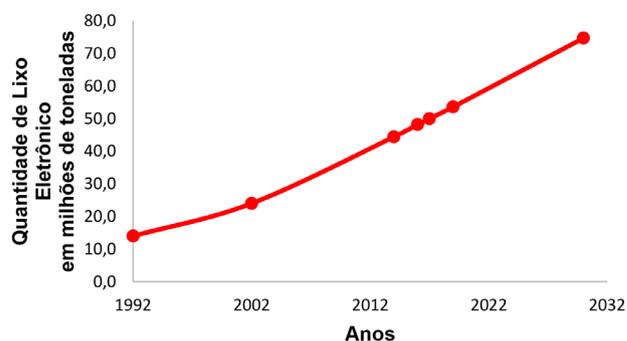


Figura 1. Geração de lixo eletrônico no mundo desde 1992 com projeção para 2030^{2,3,5} waste printed circuit boards (WPCBs)

anual de quase 0,4 milhões de toneladas. No entanto, a geração total de lixo eletrônico aumentou 9,2 milhões de toneladas, com um crescimento de quase 2 milhões de toneladas por ano. Assim, é possível notar que as atividades de reciclagem não acompanham o crescimento global do lixo eletrônico.²

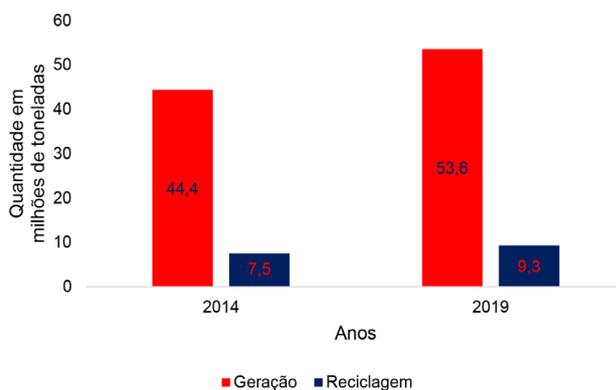


Figura 2. Relação entre geração e reciclagem de lixo eletrônico entre os anos de 2014 e 2019²

Em relação a geração de lixo eletrônico por continentes (Figura 3), a Ásia gerou a maior quantidade de lixo eletrônico em 2019, o equivalente a 24,9 milhões de toneladas, seguido das Américas, com 13,1 milhões de toneladas e Europa, com 12 milhões de toneladas, enquanto a África e Oceania geraram 2,9 e 0,7 milhões de toneladas, respectivamente.²

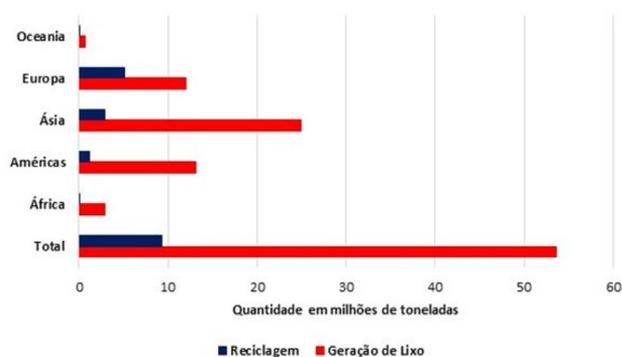


Figura 3. Geração total de lixo eletrônico e quantidade coletada, documentada e reciclada por continentes²

As estatísticas mostram que em 2019, o continente com a maior taxa de coleta e reciclagem foi a Europa, com cerca de 42,5%. Em seguida, a Ásia apresenta taxa de 11,7%, as Américas e Oceania foram semelhantes em 9,4 e 8,8%, respectivamente, e a África teve a menor taxa de coleta e reciclagem, de 0,9%, conforme Figura 3.² O melhor desempenho da Europa na reciclagem pode ser explicado pela existência de regulamentos bem organizados e sistemáticos para a gestão de resíduos, pois a taxa de coleta e reciclagem mantém uma estreita relação com a existência de legislação ou regulamentação local para o lixo eletrônico.^{2,3}

Dentre os países da América do Sul, o Brasil possui a maior geração de lixo eletrônico, o equivalente a 2,143 milhões de toneladas em 2019, seguido da Argentina, com 0,465 milhões de toneladas, e da Colômbia, com 0,318 milhões de toneladas de lixo eletrônico.² Além disso, desses mais de 2 milhões de toneladas de resíduos eletrônicos descartados pelo Brasil, menos de 3% foram reciclados. Essa estatística classifica o Brasil como o quinto país maior produtor de lixo eletrônico no mundo, antecedido apenas pelo Japão, Índia, EUA e China, conforme a Tabela 2.^{1,2}

Pode-se perceber, de acordo com as estatísticas informadas no Relatório Global de Lixo Eletrônico, que o destino de 82,6% do lixo eletrônico (44,3 milhões de toneladas) gerados em 2019 possui uma direção incerta, e o impacto ambiental causado por essa finalidade equivocada varia entre as diferentes regiões do mundo.² As taxas de reciclagem em diferentes países variam muito, a maioria das quais foi inferior a 50%, resultando em desperdício significativo de recursos e grave poluição ambiental.^{5,9}

Tabela 2. Dez maiores produtores globais de lixo eletrônico em 2019²

Classificação	País	Geração de lixo eletrônico (milhões de toneladas)
1	China	10,129
2	EUA	6,918
3	Índia	3,230
4	Japão	2,569
5	Brasil	2,143
6	Rússia	1,631
7	Indonésia	1,618
8	Alemanha	1,607
9	Reino Unido	1,598
10	França	1,362

Os países de alta renda, geralmente enviam os produtos descartados para serem reconicionados e reutilizados em países de baixa ou média renda. No entanto, grande parte do lixo eletrônico é exportado ilegalmente para países de renda média e baixa, sob o pretexto de ser para reutilização ou fingindo ser sucata. Diante disso, é estimado que de 7 a 20% do lixo eletrônico gerado seja direcionado aos movimentos transfronteiriços entre os países.^{1,2}

Nesses países, para onde o lixo eletrônico é direcionado, a infraestrutura e a gestão do mesmo ainda não estão totalmente desenvolvidas ou, em alguns casos, estão totalmente ausentes. Dessa maneira, a gestão do lixo eletrônico é realizada pelo setor informal, e tratado em péssimas condições, causando sérios prejuízos à saúde dos trabalhadores.^{2,10}

A maioria das nações desenvolvidas e em desenvolvimento está estruturando políticas e leis rigorosas para promover o gerenciamento do lixo eletrônico de forma sustentável desde a coleta até as etapas de reciclagem.^{1,11} Alguns países desenvolvidos já possuem sistemas de reciclagem e processamento de resíduos eletrônicos relativamente maduros. Japão, Alemanha e Suíça são líderes mundiais no que diz respeito à reciclagem de lixo eletrônico.¹² Esses países usam sistemas de reciclagem para reduzir a poluição e reciclar recursos. Redes de larga escala e sistemas de coleta de recursos são construídos em parques industriais, para alcançar o descarte centralizado de resíduos.^{6,13}

Desde 2001, o Japão implementou a “lei de reciclagem de eletrodomésticos” para ajudar os fabricantes a coletarem lixo eletrônico. Como também, a Alemanha desenvolveu um sistema de “responsabilidade dividida pelo produto”, na qual os fabricantes também são obrigados a promover o reaproveitamento dos resíduos. Além disso, a Suíça foi o primeiro país a estabelecer um sistema de gestão de reciclagem, e possui dois conjuntos de sistemas, que são: a Associação Suíça de Informação, Comunicação e Tecnologia Organizacional (SWICO), e a Fundação para Descarte da Suíça (SENS). Esses sistemas gerenciam resíduos de computadores, equipamentos eletrônicos de tecnologia da informação e eletrodomésticos.^{6,13}

Desde 2014, o número de países que adotaram uma política nacional de lixo eletrônico, com legislação ou regulamentação aumentou de 61 para 78.² No entanto, os avanços regulatórios em algumas regiões são lentos, a aplicação é deficiente e a política, legislação ou regulamentação ainda não estimula a coleta e o manejo adequado do lixo eletrônico devido à falta de investimento e motivação política.²

Assim, a gestão adequada do lixo eletrônico para todos os países é necessária e crucial para garantir a saúde humana e alcançar a sustentabilidade do ecossistema. Uma vez que o tratamento inadequado do lixo eletrônico gera sérios problemas de poluição do solo, do ar e da água. Isto é, o lixo eletrônico polui os lençóis freáticos, acidifica o solo, gera fumaça e gases tóxicos após a queima, acumula-se mais rapidamente nas áreas de descarte municipal e libera substâncias cancerígenas no ar.^{1,3}

3. Placas de Circuito Impresso

A PCI é o componente essencial de qualquer equipamento eletrônico. São utilizadas para conectar eletricamente e suportar mecanicamente os outros componentes eletrônicos.

A estrutura básica das placas de circuito impresso são caminhos condutores ou trilhas gravadas em folhas de cobre laminadas sobre um substrato não condutor, que consiste em resina epóxi reforçada com vidro, e vários materiais metálicos, como também metais preciosos.³⁻⁶

O ritmo acelerado das inovações e a frequência de substituição desses equipamentos elétricos e eletrônicos tornaram as PCIs um dos fluxos de resíduos que mais crescem no mundo.⁷ Na maioria dos equipamentos eletrônicos, as PCIs são componentes importantes que contêm a maior quantidade de metais, especialmente cobre e metais preciosos.^{14,15} Por isso, sua principal característica é ter a composição altamente heterogênea, já que possui vários metais, não metais, cerâmica, fibra de vidro e plásticos.¹⁶ Além disso, possuem teores de ouro, platina e cobre até 50 vezes maiores do que os recursos primários de metal, e, portanto, tornam-se um atrativo recurso secundário de metal.^{6,15}

O alto valor monetário referente aos metais preciosos como, ouro, prata e platina, presentes nos resíduos, tornou-se a principal força motriz econômica para a reciclagem de lixo eletrônico.^{6,17,18} O ouro tem a maior prioridade de recuperação, seguido pelo cobre, paládio, alumínio, estanho, chumbo, platina, níquel, zinco e prata.^{6,19} Então, pode-se perceber que muitos materiais valiosos contidos nas PCIs fazem com que valham a pena ser reciclados, exceto as substâncias perigosas. Logo, desenvolver uma tecnologia de processamento não poluente, eficiente e de baixo custo para a reciclagem de PCIs pode não apenas evitar a poluição ambiental, como também ajudar a reciclar recursos valiosos, que têm grande importância para a melhoria contínua do ambiente de vida humano e para os recursos naturais.^{3,7}

Informações contidas nos Relatórios da EPA (Agência de Proteção Ambiental dos EUA) afirmaram que reciclando 1 milhão de telefones celulares, pode-se recuperar 10 toneladas de cobre, 0,01 toneladas de paládio, 0,275 toneladas de prata e 0,025 toneladas de ouro.¹²

4. Composição Química

A composição elementar varia dependendo do tipo de PCI e suas aplicações. No entanto, de maneira geral, as PCI contêm, aproximadamente, 40% de metais, 30% de plásticos e 30% de materiais cerâmicos e vidro.^{4,16,20} Cerca de 10-20% das PCI são feitas de cobre, pois é esse metal que forma a camada condutora para conexão elétrica entre os diferentes componentes. Metais preciosos como ouro e paládio são usados como materiais de contato em juntas. As soldas típicas de chumbo e estanho são usadas para unir diferentes componentes e representam de 4-6% do peso total das placas. Os metais do grupo da platina estão presentes em relés, chaves ou sensores.^{4,15} O substrato é feito, principalmente, de resinas epóxi ou cianeto, no caso de multicamadas, ou resinas fenólicas, no caso de face simples. O principal material de reforço para o substrato é

o tecido, feito de fibras de vidro ou sílica.^{4,15} A composição aproximada de uma PCI é mostrada na Tabela 3.

Tabela 3. Composição aproximada de uma placa de circuito impresso³

Metais	(%)	Cerâmica	(%)	Plástico	(%)
Cu	6-27	SiO ₂	15-30	PE	10-16
Fe	1,2-8,0	Al ₂ O ₃	6,0-9,4	PP	4,8
Al	2,0-7,2	Óxidos de alcalinos terrosos	6,0	PS	4,8
Sn	1,0-5,6			Epóxi	4,8
Pb	1,0-4,2			PVC	2,4
Ni	0,3-5,4			PIPE	2,4
Zn	0,2-2,2			Nylon	0,9
Sb	0,1-0,4				
Au (ppm)	250-2050				
Ag (ppm)	110-4500				
Pd (ppm)	50-4000				
Pt (ppm)	5-30				

Além disso, as PCI também contêm diferentes elementos, incluindo metais pesados (Cr, Hg, Cd etc.), elementos de terras raras (La, Ce, Pr etc.) e retardadores de chama que representam um grave perigo para o ecossistema durante o tratamento convencional em aterros e incineração, pois geram efeitos adversos no ambiente e na saúde humana.^{4,5,15,20}

É importante notar que diferentes tipos de PCI possuem diferentes teores de metais, especialmente no que diz respeito aos metais preciosos. Por exemplo, uma PCI de computador típica contém 20% de cobre, 1000 ppm de prata, 250 ppm de ouro e 110 ppm de paládio. Uma PCI de telefone celular contém 13% de cobre, 1380 ppm de prata, 350 ppm de ouro e 210 ppm de paládio. Como também, uma PCI de TV contém 10% de cobre, 280 ppm de prata, 20 ppm de ouro e 10 ppm de paládio.^{6,17} Na Tabela 4 estão apresentados os teores de metais presentes em uma PCI de computadores de mesa.

Devido ao grande aumento do lixo eletrônico em todo o mundo, e o alto teor de metais, especialmente metais preciosos presentes, a reciclagem de PCIs tem ganhado

Tabela 4. Concentração de metais em placas de circuito impresso de computadores^{6,21}

Metal	Quantidade (%)
Prata (Ag)	0,10
Paládio (Pd)	0,011
Alumínio (Al)	5,7
Ouro (Au)	0,025
Cobre (Cu)	20,19
Ferro (Fe)	7,33
Níquel (Ni)	0,43
Chumbo (Pb)	5,53
Estanho	8,83
Zinco (Zn)	4,48

importância, o que não apenas reduzirá a poluição ambiental, mas também conservará os recursos naturais e a energia.^{6,22,23} the recycling of metals/materials from various alternative resources particularly from metallurgical waste and complex such as E-waste (Electronic waste Por isso, fabricantes, agências ambientais e governos de todo o mundo estão à procura de uma tecnologia de reciclagem sistemática e ecológica para esses resíduos de PCIs, pela qual se possa recuperar os valores metálicos e não metálicos, proporcionando um impacto mínimo ao meio ambiente.⁴

5. Reciclagem Informal de Placas de Circuito Impresso

Os resíduos de PCIs têm recebido muita atenção de pesquisadores e empresas, não apenas devido ao seu rico conteúdo de recursos, mas também devido ao seu risco potencial ao meio ambiente e a saúde humana com a reciclagem informal.^{3,5,6} Além disso, grande parte do lixo eletrônico coletado para reciclagem nos países desenvolvidos, é exportado para países em desenvolvimento como China e Índia, onde é tratado de maneira informal, em que a parcela mais pobre da população encontra benefícios econômicos ao recuperar metais preciosos com métodos rudimentares.⁴

A recuperação de metais de maneira informal é realizada por meios não científicos e antiéticos com mínimas ou nenhuma medida de segurança. Esse processo de recuperação contamina os recursos naturais e coloca em risco a saúde humana.¹ E-waste is a major sector growing at an annual rate of about 2 million tonnes (Mt As técnicas comuns e primárias de descarte de lixo eletrônico nos países desenvolvidos são aterros sanitários e incineração.⁴ Esses resíduos são tradicionalmente destinados a aterros sanitários, nos quais sua lixiviação contamina o solo e as águas subterrâneas em regiões próximas.^{6,24} Outra importante via de descarte envolve a incineração, a qual gera vários problemas ambientais, como produção de produtos estrogênicos e presença de gases tóxicos nas emissões.⁶

Além disso, a eficiência de extração de metais nas reciclagens informais é inferior a 80%, ao passo que pode ser alcançada mais de 95% no processamento formal de lixo eletrônico.¹ Assim, para a sustentabilidade em longo prazo, um sistema integrado de gestão de resíduos consiste principalmente em três fatores principais – reduzir, reutilizar e reciclar, mais conhecido como política 3R, é a abordagem preferível.⁴

6. Reciclagem Formal de Placas de Circuito Impresso

Existem vários desafios a serem considerados para implementar uma nova tecnologia de reciclagem de resíduos de PCIs, que deve ser impulsionada por inovações, pelo

impacto social e ambiental, pela política integrada de gestão de resíduos e pela economia do processo.³ Dentre eles, os principais são:^{3,5}

- A diversidade e a complexidade dos resíduos de PCI;
- A composição variável de acordo com a origem do equipamento eletroeletrônico;
- A presença de plásticos, cerâmicas e metais dificulta a liberação e separação de cada fração;
- A presença de numerosos elementos metálicos deixa o processo de recuperação muito complexo, principalmente, quando estão presentes em concentrações muito baixas;
- Devido ao baixo valor econômico, a reciclagem da fração não-metálica tem sido frequentemente ignorada causando ainda mais desperdício de recursos e poluição ambiental;^{4,5} waste printed circuit boards (WPCBs
- Os processos para reciclagem das frações metálicas muitas vezes não são ambientalmente corretos;

Assim, na reciclagem formal, existe uma abordagem sistemática que envolve a coleta de lixo eletrônico, seguida do processo de pré-tratamento e, por fim, o processo de recuperação do metal, conforme ilustrado na Figura 4. Inicialmente, antes da recuperação dos metais, os resíduos de PCI são submetidos ao processamento mecânico, que inclui desmontagem manual, remoção da solda, técnicas para redução de tamanho, moagem, trituração, pulverização e separação por gravidade, com o objetivo de separar a fração metálica da fração não metálica.¹² Em seguida, com a finalidade de extrair os metais, a parte que contém a fração metálica é direcionada para processos metalúrgicos tradicionais, tais como: processos pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos e biohidrometalúrgicos.^{1,12,14,15} Ao fim desses processos, os metais podem ser recuperados por outros métodos, como: extração por solvente, troca iônica, precipitação, entre outros.^{7,8}

Devido ao baixo valor econômico, a reciclagem da fração não metálica tem sido frequentemente ignorada causando ainda mais desperdício de recursos e poluição ambiental.⁵ No entanto, algumas tecnologias vêm sendo desenvolvidas para o processamento da fração não metálica, assim como novos processos, mais eficientes e com menor impacto ambiental, para o processamento da fração metálica presente nos resíduos de PCI.⁷

Assim, o tratamento desses resíduos para recuperação de metais é benéfico tanto do ponto de vista ecológico quanto econômico, pois haverá recuperação dos metais valiosos e conservação dos recursos naturais.^{7,12} No entanto, nenhum processo único é satisfatório para o processo de recuperação por completo, por isso, várias etapas, como tratamento mecânico, separação física e tratamentos metalúrgicos são aplicados para desenvolver um processo múltiplo.¹²

Logo, para identificar as melhores opções para reciclagem formal, é necessário discutir em detalhes o estado atual das tecnologias de recuperação de metais básicos e preciosos de resíduos de PCIs.

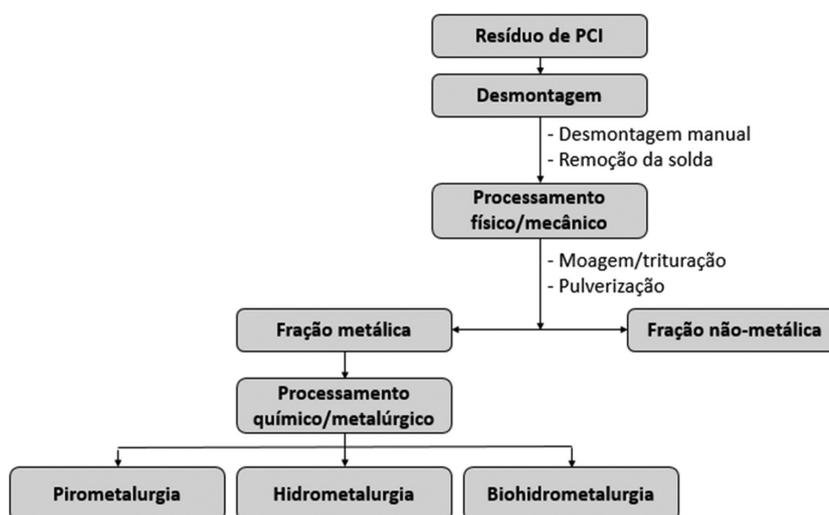


Figura 4. Processos tradicionais de reciclagem formal para extração de metais de resíduos de PCI¹²

7. Métodos Mecânicos/Físicos

O processamento mecânico é o requisito prévio das técnicas de hidrometalurgia e biohidrometalurgia para recuperar metais, e são divididas nas seguintes etapas: pré-tratamento, separação de frações metálicas e não metálicas, e técnicas químicas para reciclagem das frações não metálicas. Cada etapa será explorada nos tópicos seguintes.

7.1. Pré-tratamento

O pré-tratamento de resíduos de PCI geralmente consiste em desmontagem, remoção de solda e processamento físico, que então alimenta as técnicas de separação física.¹⁰ A Figura 5 resume essas etapas.

A desmontagem é a remoção sistemática de componentes e peças das placas de circuito impresso.³ Ela é dividida em dois tipos: a seletiva e a simultânea. Na desmontagem

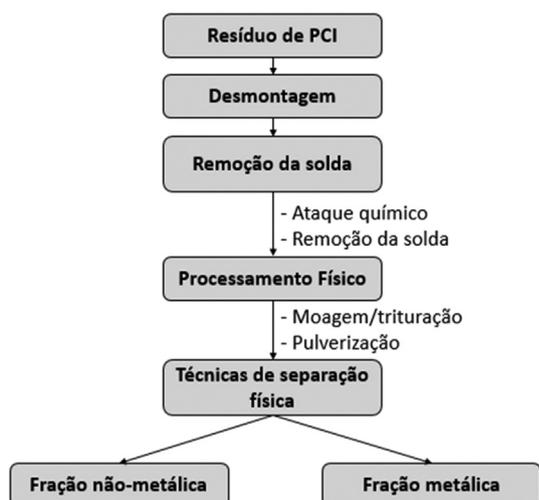


Figura 5. Metodologia de pré-tratamento de resíduos de PCI¹⁰

seletiva o processo é gradual, no qual os componentes específicos são localizados e removidos individualmente. A desmontagem simultânea é realizada em apenas uma etapa, já que nesse caso a placa de circuito impresso é aquecida para dessoldar os componentes simultaneamente. Embora esse método tenha alta eficiência, também corre o risco de danificar os componentes durante o aquecimento, e como o tempo de processamento é maior, consequentemente o custo também é maior.¹⁰

Após essa etapa, os resíduos de PCI restantes passam por processamento físico, como trituração, moagem e pulverização. São utilizadas diferentes máquinas e equipamentos para o processo de trituração, como: trituradores de martelo, moinhos de corte, granuladores, cortadores, moinhos de bolas, pulverizadores, entre outros.^{3,10} Granuladores de alta capacidade (200 a 500 kg/h) também são utilizados para produzir vários tamanhos de partículas e recuperar componentes metálicos, ferrosos, não ferrosos e plásticos.^{12,25} Além disso, para evitar a poluição por poeira, são utilizados equipamentos para sua remoção em três estágios (ciclone, saco e filtro de ar).³

Esses processos de separação física se beneficiam de baixos custos operacionais e de capital, no entanto, sofrem com uma alta perda de metal valioso (10-35%) causada pela liberação insuficiente de metal.³ Além disso, após o processo de trituração, as PCI não resultam em uma fração granulométrica específica, devido principalmente à heterogeneidade da composição física das PCI, em que as frações não metálicas tendem a se concentrar em frações mais finas, enquanto as frações metálicas apresentam maior tamanho de partículas.¹⁰

7.2. Separação de frações metálicas e não metálicas

As frações não metálicas são compostas por polímeros (plásticos), naturalmente hidrofóbicos (PE, PP, PVC, PTFE, nylon, PEE, epóxi); por retardadores de chama,

que são componentes tóxicos (flúor, cloro, bromo, BRF, PBB e PBDE); por fibra de vidro, que é abrasiva e inclui fibras, resina epóxi e TBBPA; e por materiais cerâmicos não condutores, como sílica, alumina e óxidos de alcalinos terrosos.^{3,10} É necessário recuperar as frações não metálicas sem perda de metais valiosos. E para isso, três principais técnicas são utilizadas: separação por densidade, separação eletrostática e separação magnética.^{3,5,10} A Figura 6 mostra um esquema de técnica de separação física para a separação de frações metálicas e não metálicas.

Inicialmente, os resíduos de placas de circuito impresso são submetidos a separação magnética. Nesta técnica são usados separadores de tambor especiais de baixa intensidade para recuperar materiais ferrosos das frações não magnéticas de PCI. Esse procedimento só é eficaz para placas que ainda não foram trituradas.^{8,10}

Após a trituração, é realizada a separação eletrostática. Essa técnica é baseada na diferença de condutividade elétrica, para obter uma mistura de pó metálico condutor, contendo Cu, Pb, Zn, Al, Sn, Au, Ag, entre outros metais e pó de resina não condutor, através de uma fonte corona ou de uma corrente parasita (*eddy current*).³ Na separação eletrostática de fonte corona foi observado que quanto menor o tamanho da partícula mais eficiente a separação.^{8,10} Enquanto que na separação eletrostática baseada em correntes parasita além das partículas finas, as partículas grossas também podem sofrer uma separação eficiente.¹⁰

Em seguida, o restante do material é submetido a separação por densidade. Essa separação é baseada na forma das partículas, ou seja, os resíduos de PCI triturados são separados em uma fração leve e uma pesada, dentre as quais a fração leve flutua e a fração pesada afunda.⁸ Os metais são efetivamente separados dos plásticos através do uso de misturas líquidas, como tetrabromoetano e acetona.¹⁰

O principal desafio associado a essas técnicas de separação física é o alto potencial de perda de metais preciosos. Além disso, do ponto de vista energético e econômico, todos esses tratamentos físicos podem incorrer

em altos custos operacionais, assim, a fração metálica se encontra separada e disponível para os processos metalúrgicos/químicos de extração de metais.¹⁰

8. Métodos Metalúrgicos/Químicos

Os processos metalúrgicos são utilizados nas etapas de beneficiamento e refino da cadeia de reciclagem de resíduos de placas de circuito impresso.^{3,5,7} Os principais processos de recuperação de metais são pirometalúrgico e hidrometalúrgico. O processo pirometalúrgico envolve o enriquecimento de metais por fundição, conversão e refino, e é considerado o tratamento mais tradicional e usado industrialmente. O processo hidrometalúrgico está associado ao uso de soluções ácidas ou alcalinas para solubilizar os resíduos triturados, por uma técnica chamada de lixiviação.^{5,8} Além desses processos, mais recentemente o processo biohidrometalúrgico ganhou força com o crescente desenvolvimento da técnica de biolixiviação, em que os microrganismos auxiliam na solubilização dos metais.¹⁰

Os principais processos de recuperação de metais são mostrados na Figura 7.

8.1. Pirometalurgia

A pirometalurgia é um processo de uso intensivo de energia empregado no refino ou extração de metais não ferrosos de materiais metalúrgicos em temperaturas extremas.¹ Como também, é a rota mais tradicional e utilizada para separação e recuperação de metais e envolve diversos processos, tais como: incineração, fundição em arco de plasma ou fornos de alta temperatura, sinterização, conversão, fusão, reações em fase gasosa em altas temperaturas e refino.^{8,10} No entanto, a incineração, fundição e torrefação são os métodos pirometalúrgicos mais utilizados.¹²

O método pirometalúrgico pode recuperar vários metais

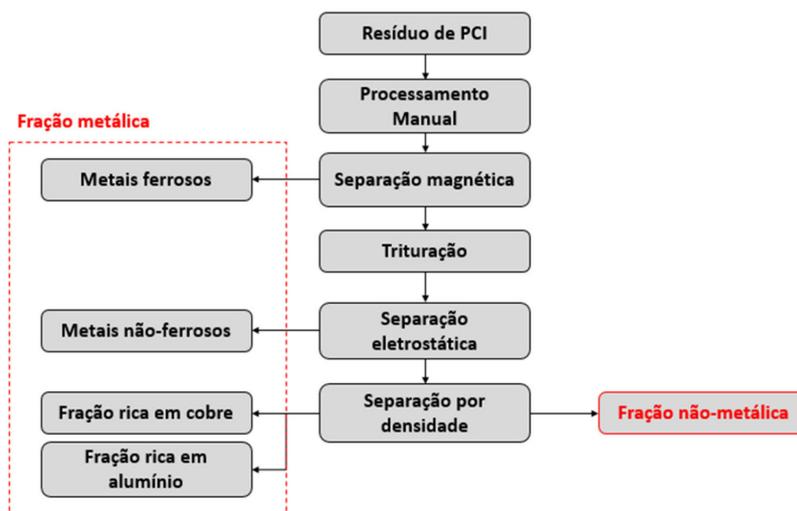
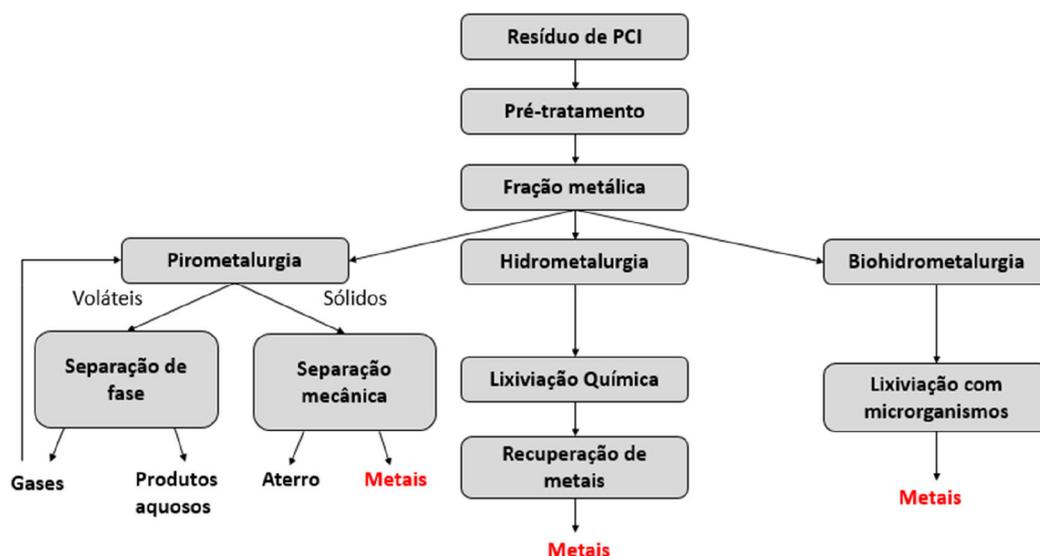


Figura 6. Fluxograma de separação física entre frações metálicas e não metálicas¹⁰


 Figura 7. Principais processos de recuperação de metais de resíduos de PCI¹⁰

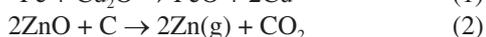
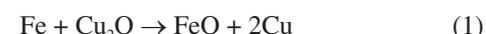
como Cu, Ag, Au, Pd, Ni, Se, Zn e Pb de diferentes fontes de lixo eletrônico. Porém, é altamente desafiador manter os parâmetros operacionais para a recuperação bem-sucedida de metais preciosos.^{1,12}

Durante o processo de fundição, os resíduos de PCIs contendo metais (comuns e preciosos) são queimados em um forno de alta temperatura (1250 °C) e, em seguida, os metais são volatilizados, com 99,1% de pureza, por uma reação química ou por calor, e as impurezas são convertidas em escórias. Assim, os metais enriquecidos são fundidos em fornos e podem ser obtidos lingotes grossos de metal.^{8,12}

A etapa mais importante para a pirometalurgia é a fundição, e existem dois processos básicos de fundição: a fundição instantânea (*flash*) e a fundição por banho. A principal diferença entre essas duas técnicas é que na fundição instantânea há o emprego de gás oxigenado para promover condições autógenas, enquanto que na fundição por banho a reação ocorre em uma poça de fusão contendo as fases de fusão e escória.^{8,10,26}

O processo de fundição Noranda no Canadá e o processo de fundição Umicore, mais avançado, na Bélgica são os principais exemplos de técnicas pirometalúrgicas industriais simplificadas.^{8,10,17} O processo Umicore é mais refinado com sua etapa de lixiviação e eletroextração de cobre, seguida por etapas de recuperação de metais preciosos para aumentar o valor da recuperação do metal. Além disso, esse processo inclui o tratamento avançado de gases de escape que evita a liberação de materiais tóxicos e reduz os riscos humanos e ambientais.¹⁰

As seguintes reações (equações 1 e 2) ocorrem em um processo de fundição em forno de alta temperatura:²⁷and decreasing as a result of rapid changes in equipment features and capabilities. This creates a large waste stream of obsolete electronic equipment, electronic waste (e-waste



O produto do forno de altas temperaturas quando utilizado para recuperação de cobre é chamado de cobre negro e inclui 70-85% em peso de cobre. Este cobre negro é alimentado no conversor para ser oxidado. O conversor usa ar ou ar enriquecido com oxigênio para produzir óxidos. Impurezas (Sn, Pb, Zn) são queimadas e o ferro é removido como escória. Em um forno de ânodo, bolhas e sucata de cobre são fundidas. Metais menos nobres que o cobre são seletivamente oxidados.²⁷and decreasing as a result of rapid changes in equipment features and capabilities. This creates a large waste stream of obsolete electronic equipment, electronic waste (e-waste Ao adicionar um agente redutor (coque, madeira e plástico), o cobre fundido é reduzido, conforme a equação 3.



Em seguida, existe o processo de conversão. Nessa etapa ocorre a oxidação do sulfeto de ferro e a conversão de sulfeto de cobre em cobre metálico. O último processo é o de refino, que tem o objetivo de obter cobre de alta pureza nos fornos reverberatórios ou rotativos.⁸ O fluxograma de um processo pirometalúrgico para reciclagem de cobre está indicado na Figura 8.

A presença de ligas e misturas de metais puros torna a recuperação dos metais finais uma tarefa desafiadora e requer mais energia.¹² Além disso, a formação de escória afeta fortemente o rendimento de recuperação do processo, pois pode prejudicar o processo de extração do metal.¹

Além disso, durante o processo pirometalúrgico a formação de escórias, fuligem e gases de combustão, compostos por poeira de alta temperatura, fumaça e gases tóxicos são inevitáveis. Os gases tóxicos incluem dibenzodioxinas polibromadas (PBDDs), fenol, dibenzop-dioxina, bifenil, antraceno, dibromobenzeno, naftaleno e dibenzofuranos polibromados (PBDF), que são altamente perigosos e são capazes de afetar a saúde humana e a atmosfera, causando sérios problemas ambientais.^{1,12,28}

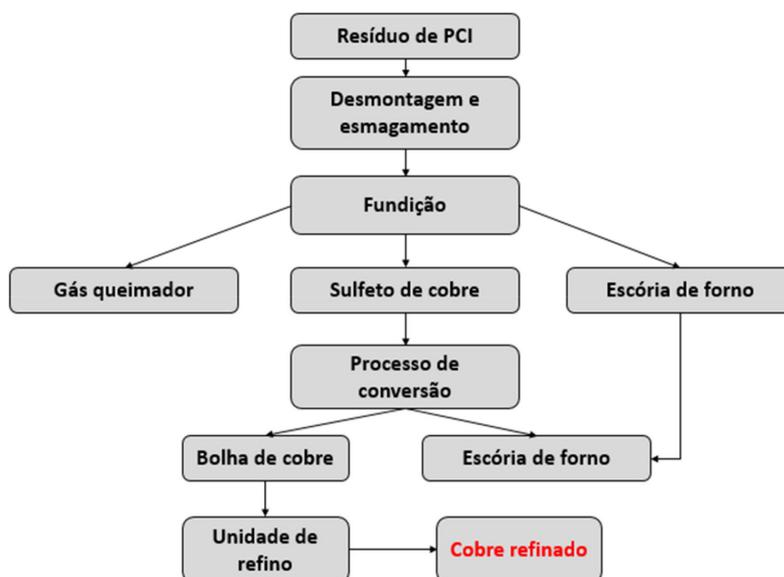


Figura 8. Fluxograma do processo pirometalúrgico para reciclagem de cobre⁸

Portanto, a pirometalurgia é capaz de reciclar metais básicos, como cobre, chumbo, zinco, entre outros, e esses metais podem ser obtidos com alta pureza através do processo de fundição e refino. No entanto, mesmo que as técnicas da pirometalurgia tenham melhorado muito no decorrer dos anos, os problemas de poluição ainda são inevitáveis, com a liberação de partículas finas e gases tóxicos.¹ Além disso, os equipamentos são caros (alto investimento de capital), consomem grande quantidade de energia e não são adequados para pequenas e médias empresas. E mais importante: a tecnologia não possui seletividade na reciclagem de metais raros e preciosos, e apresenta complexidade na recuperação de metais puros.^{7,8,10,12}

Há também a pirometalurgia à vácuo, que consiste em outra forma de pirometalurgia, na qual metais com diferentes pressões de vapor são separados por destilação ou sublimação e recuperados por condensação, e a temperatura e pressão podem ser reduzidas.^{5,10}

Análises tecnoeconômicas recentes da pirometalurgia revelaram que o processo de reciclagem de lixo eletrônico incorporado na fundição de cobre tem valor potencial e é economicamente viável com uma capacidade mínima da planta de 30.000 toneladas de lixo eletrônico por ano, o que equivale a um processamento de 2.500 toneladas de lixo eletrônico por mês.¹⁰

8.2. Hidrometalurgia

O método hidrometalúrgico designa processos de extração de metais nos quais a principal etapa de separação envolve reações de dissolução dos resíduos de PCIs, chamada de etapa de lixiviação.²⁹ Esse método envolve uma série de lixiviações ácidas ou cáusticas de resíduos de PCIs, seguidas de técnicas de separação e purificação, como cimentação, extração por solvente, troca iônica e adsorção por carvão ativado, entre outros, para isolar e concentrar

os metais das soluções lixiviadas.^{10,14,30} Essa técnica é facilmente controlável, mais exata, previsível e amiga do meio ambiente em comparação com a pirometalurgia.¹⁰

Devido à preocupação ambiental, estão sendo desenvolvidas novas técnicas hidrometalúrgicas voltadas à reciclagem ecologicamente correta de metais. Assim, alguns agentes de lixiviação suaves e tecnologias modificadas são propostas, pois oferecem custos de construção mais exatos, relativamente baixos e uma certa taxa de recuperação de metais com sua adequação para aplicações em pequena escala.⁸

As etapas principais do processo hidrometalúrgico estão representadas na Figura 9.

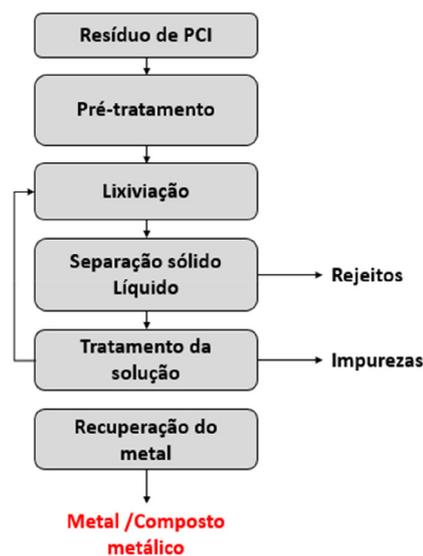


Figura 9. Etapas principais de um processo hidrometalúrgico²⁹

Nos processos tradicionais de hidrometalurgia é utilizada principalmente a lixiviação ácida para recuperar metais.^{8,10,31,32}

Existem várias técnicas usadas no método hidrometalúrgico para dissolução de metais em resíduos de PCI, e as principais são divididas em convencionais e mais verdes. Dentro das técnicas convencionais, estão englobadas a lixiviação com cianeto; a lixiviação ácida, com utilização dos ácidos nítrico, sulfúrico, clorídrico e água régia; a lixiviação com tiourea e com tiosulfato, para recuperação de metais preciosos. Enquanto que, nas técnicas mais verde, estão a lixiviação com ligantes, utilizando EDTA (ácido etilendiaminotetra-acético), sais de DTPA (dietilenotriaminopenta-acetato de pentassódio, complexante alcalino), sais de oxalato e citrato; gravação com FeCl_2 , CuCl_2 , HCl e solventes orgânicos; e a biolixiviação, com utilização de micro-organismos.^{10,30,32}

A Figura 10 destaca os vários ramos da hidrometalurgia e os principais agentes de lixiviação utilizados para extração de metais de resíduos de PCI.

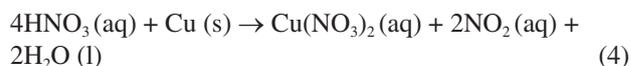
Em seguida, são necessárias técnicas para recuperação dos cátions metálicos dissolvidos em solução aquosa, resultante da etapa de lixiviação. As técnicas mais utilizadas são: as técnicas de precipitação, em que estão incluídas a cimentação, a extração por solvente, a adsorção com carvão ativado e a troca iônica; e a eletrodeposição, com o uso de soluções de ácido nítrico, sulfúrico, água régia e amoniacais.^{6,10} Até o momento, as tecnologias hidrometalúrgicas têm sido extensivamente aplicadas para recuperar metais preciosos, como ouro, prata e cobre, do lixo eletrônico devido sua alta eficácia, acessibilidade, baixa temperatura operacional e baixa emissão de gases.^{30,33,34}

As técnicas tradicionais de lixiviação incluem ácidos minerais, como: ácido sulfúrico, ácido clorídrico e ácido nítrico. Geralmente, os metais comuns como Zn, Sn, Fe e Al podem ser dissolvidos em ácidos diluídos.^{5,14} hydrogen peroxide volume and temperature on the metal extraction yield were studied by analysis of variance (ANOVA No entanto, o cobre só pode ser lixiviado usando ácidos oxidantes ou misturas de ácidos não oxidantes com oxidantes. Além disso, a concentração de ácidos é o parâmetro mais influente durante os processos de lixiviação.^{5,35}

Os principais lixivantes utilizados para extrair metais como cobre, chumbo e zinco de resíduos de PCIs são: ácido nítrico (HNO_3), ácido clorídrico (HCl) e ácido sulfúrico (H_2SO_4).^{6,8,12,14} Os ácidos sulfúrico e clorídrico sozinhos não são eficazes e requerem a presença de um oxidante adequado, como por exemplo peróxido de hidrogênio. Por outro lado, o ácido nítrico tem a peculiaridade de ser um ácido oxidante forte, o que o torna um agente de lixiviação eficiente para o tratamento de lixo eletrônico.³⁵ Além disso, ácido nítrico em combinação com ácido clorídrico na forma de água régia promove uma digestão não seletiva e agressiva de metais básicos e preciosos, incluindo cobre, chumbo, zinco, prata entre outros.^{7,8,12}

Na sequência são apresentados os principais agentes de lixiviação utilizados.

Ácido Nítrico: dentre as principais soluções ácidas, o ácido nítrico é a solução de lixiviação mais estudada, principalmente para a lixiviação de cobre, estanho e chumbo em resíduos de PCI.¹⁰ De acordo com a literatura¹⁰, na lixiviação ácida com ácido nítrico, a reação geral (Equação 4), é a seguinte:



Pesquisadores realizaram o delineamento Box-Behnken para estudar o efeito e a interação dos parâmetros de lixiviação, tais como: concentração de ácido nítrico ($0,2\text{-}2 \text{ mol L}^{-1}$), temperatura ($30\text{-}70 \text{ }^\circ\text{C}$) e densidade da polpa ($2\text{-}10\% \text{ p/v}$). Além disso a cinética de lixiviação também foi examinada usando o modelo de partícula de encolhimento (experimentos de 120 min). Como resultado, concluíram que altas concentrações de ácido nítrico ($2\text{-}5 \text{ mol L}^{-1} \text{ HNO}_3$) foram necessários para atingir alta extração de cobre ($88,5\text{-}99,9\%$) a uma densidade de polpa de $6\% \text{ peso/volume}$. Assim, o cobre pode ser extraído seletivamente dos resíduos de PCI de TV ajustando a concentração de ácido nítrico.³⁵

Também foram feitos estudos sistemáticos para recuperação de metais usando ácido nítrico em sistema

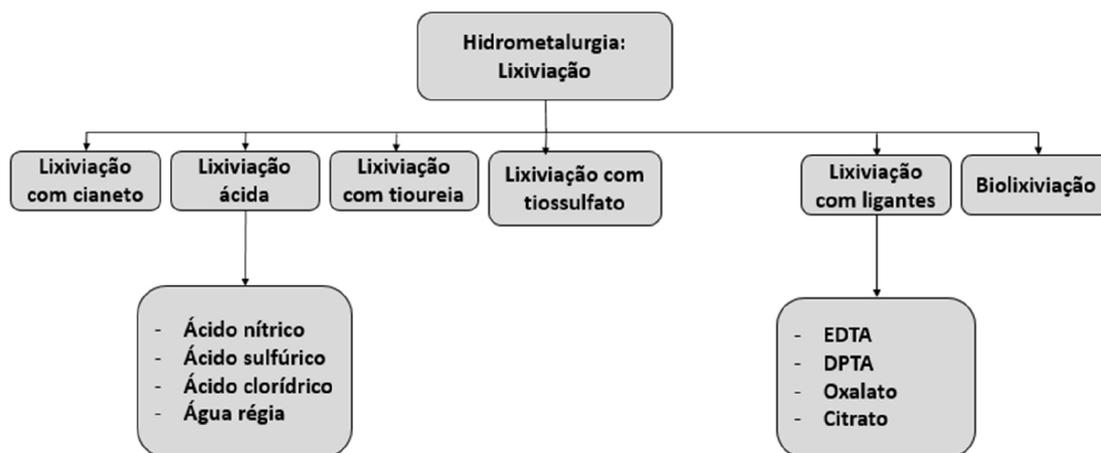


Figura 10. Principais agentes de lixiviação utilizados na recuperação de metais¹⁰

fechado. Foi utilizado ácido nítrico 3 mol L⁻¹, e comparando com outros ácidos puros, como HCl e H₂SO₄, o ácido nítrico apresentou vantagens, como alta seletividade, baixo custo e capacidade de fácil regeneração. Utilizando HNO₃ 3 mol L⁻¹, densidade de polpa de 75 g L⁻¹ a 75 °C, cerca de 91,58% de cobre foi lixiviado em um tempo único de 120 minutos. No entanto, em duas etapas de lixiviação mantendo a condição experimental otimizada foi possível recuperar 99,99% de cobre.²²

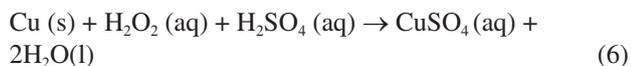
Água-régia: consiste em uma mistura de ácido clorídrico com ácido nítrico. Essa solução é altamente corrosiva e direcionada para recuperação de metais preciosos, com foco no ouro. A reação geral (Equação 5) é a seguinte:



Em geral, quanto mais concentrado o ácido na solução e quanto maior o tempo de lixiviação, maior a extração do metal. A Água régia é eficaz para lixiviação de cobre, ouro e prata, mas sua natureza altamente corrosiva impede que seja industrialmente realizável.¹⁰

Na indústria a água régia é usada apenas para processos de digestão, na abertura de amostras, para determinar o teor de metais preciosos e metais comuns, e não para a lixiviação de metais preciosos, pois resulta na liberação de gases tóxicos como o óxido de nitrogênio. Além disso, é altamente corrosiva, perigosa e resulta em alto consumo. Logo, a água régia não tem sido utilizada como lixiviante de metais.⁶

Ácido Sulfúrico: na lixiviação com ácido sulfúrico junto com agente oxidante, peróxido de hidrogênio, a reação geral (equação 6), para a dissolução do cobre pode ser expressa:



O ácido sulfúrico apresenta-se como uma alternativa promissora e eficaz, principalmente quando combinado com um agente oxidante.^{10,14} Ele é mais barato e mais fácil de regenerar do ponto de vista industrial, em relação à água régia.¹⁰ No entanto, devido ao fato dessa reação ainda ser extremamente corrosiva, é necessário o uso de um reator apropriado.

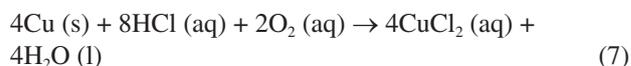
Pesquisadores realizaram a lixiviação de cobre com uso de solução de ácido sulfúrico, e peróxido de hidrogênio como oxidante à temperatura ambiente. Como resultado, obtiveram alta taxa de recuperação de cobre (aproximadamente 99,9%) com utilização de 100 mL de solução de ácido sulfúrico (15% em peso) e 10 mL de peróxido de hidrogênio (30%) para lixiviação de 10 gramas de resíduos de PCI, numa relação de sólido/líquido de 1/10 por 3 horas.³⁶

Os oxidantes comumente usados no sistema com ácido sulfúrico para lixiviar cobre são o ar ou o peróxido de hidrogênio. O ar é um oxidante promissor considerando

a economia, enquanto o peróxido de hidrogênio não é regenerável e seu preço é mais alto. No entanto, a condição do experimento é facilmente controlada e a reação de lixiviação é mais eficaz em comparação com o ar.³⁶ Além disso, a recuperação de cobre aumenta com o aumento da concentração de ácido sulfúrico.³⁶

Pesquisadores realizaram um planejamento fatorial com três variáveis (concentração de ácido sulfúrico, volume de peróxido de hidrogênio e temperatura) e dois níveis, com 3 réplicas no ponto central. Como resultado obtiveram uma taxa de 76,12% na extração de cobre no ponto ótimo (2 mol L⁻¹ ácido sulfúrico, 20 mL de peróxido de hidrogênio 30% e 30 °C) e realizando uma segunda lixiviação obtiveram 90% de extração de Cu. Concluiu-se também que a lixiviação oxidativa deve ser conduzida sem agitação ou com taxas de agitação muito baixas para evitar a degradação do peróxido de hidrogênio.¹⁴

Ácido Clorídrico: na lixiviação com ácido clorídrico para dissolução de cobre, é necessário que seja usado um agente oxidante, como peróxido de hidrogênio ou oxigênio, já que se trata de um ácido não oxidante.³⁷ A reação geral (Equação 7) é a seguinte:



Foi estudada a lixiviação de PCI em 100 mL de solução de HCl 1 mol L⁻¹, à temperatura ambiente (28 °C) com agitação a 150 rpm e após 17 horas a solução se tornou azul, indicando que o cobre já estava presente na solução, porém o tempo para a reação foi longo. Assim, com a adição de peróxido de hidrogênio, foi possível dissolver o cobre em um tempo mais curto. Para isso a solução de lixiviação obedeceu a proporção 2:1:1 em volume de água, HCl (20%) e H₂O₂ (30%). O HCl apresentou uma recuperação significativa de Ag, Al, Cu e Fe. Além disso, o cobre possui maior lixiviação apenas em ambiente oxidativo.¹⁶

Ácido hexafluorossilícico: é um composto inorgânico com a fórmula H₂SiF₆. É um produto da produção de fluoreto de hidrogênio e da produção de fertilizantes de fosfato, considerado um subproduto da indústria de fertilizantes. Devido a sua acidez, é considerado um ácido bastante corrosivo para a maioria dos metais e considerado um bom agente de lixiviação de metais, especialmente de cobre.

Pesquisadores obtiveram alta taxa de recuperação de cobre em resíduos de PCI com o uso de uma solução de lixiviação contendo ácido hexafluorossilícico. A melhor condição para extração de cobre foi de 4 horas de tratamento, com temperatura de 25 °C, utilizando 25% (v/v) de H₂SiF₆ na composição da solução.³⁸

Cianeto: para a extração de metais preciosos, como o ouro, a lixiviação com cianeto tem sido utilizada há mais de um século devido à seletividade e estabilidade do complexo (dicianoaurato) formado, além de sua alta taxa de recuperação, baixo custo e operação simples.^{5,6,39}

No entanto, grandes quantidades de complexos de cianeto são produzidas, o que gera impactos perigosos ao meio ambiente e à saúde humana, já que as águas residuais são tóxicas e prejudiciais.^{5,10} Além disso, a toxicidade do cianeto pode causar problemas ambientais e de segurança dos trabalhadores se utilizado de maneira inadequada.^{8,12,33} Por isso, a lixiviação com cianeto está sendo descartada devido à sua alta toxicidade, enquanto outros processos hidrometalúrgicos são desenvolvidos.¹⁰ Assim, mesmo sendo o reagente mais utilizado para extração de ouro de minérios, os processos de cianetação estão sendo gradualmente substituídos por lixiviação com tioureia ou tiosulfato, devido a toxicidade letal e consumo de grandes quantidades de cianeto.^{14,39} Muitos estudos relatam uma série de acidentes ambientais que justificam a preocupação do uso de cianeto como reagente de lixiviação para extração de ouro. Por isso, são estudadas diversas alternativas à cianetação.^{30,39-42}

Tioureia: a tioureia pode ser usada para lixiviar metais preciosos, principalmente ouro, de resíduos de PCI e ganhou atenção em todo mundo devido ao seu baixo impacto ambiental.⁶ Como possui baixa toxicidade e cinética rápida, é considerada um dos substitutos mais realistas ao cianeto para a lixiviação de ouro de resíduos de PCI.^{14,30} Sob condições ácidas, a tioureia ($\text{CS}(\text{NH}_2)_2$) pode ser usada para dissolver o ouro, mas nesse caso há baixa estabilidade e alto consumo de reagentes.¹⁰

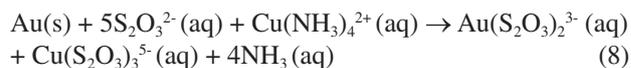
A tioureia não é estável em condições ácidas e oxidantes, já que é facilmente oxidada em dissulfeto de formamida, que se decompõe em enxofre elementar e cianamida, ou um complexo estável de sulfato férrico. Essas reações consomem grande quantidade de tioureia e apresentam grandes desvantagens.³⁰ No entanto, em condições alcalinas, a tioureia é estável, e alguns pesquisadores identificaram estabilizadores eficientes e vêm aprimorando a técnica, embora ainda esteja em um estágio inicial de desenvolvimento.⁶ No entanto, esses estabilizadores só podem inibir a decomposição irreversível da tioureia até certo ponto. No caso da lixiviação do ouro por tioureia alcalina, a taxa de lixiviação não pode atingir a taxa obtida com a lixiviação com cianeto, ou seja, o processo possui baixa eficiência, o que limita seu uso na indústria.⁶

Podem ser usados diferentes oxidantes no processo de lixiviação com tioureia, como peróxido de sódio, peróxido de hidrogênio, íons férricos, oxigênio, ozônio, dióxido de manganês, íons manganato e dicromato.¹⁴ No entanto, a adição de íons férricos tem se mostrado o mais eficaz.³⁰

Mesmo que a eficácia da tioureia como reagente de lixiviação tenha sido comprovada em diversos estudos ainda existem poucas operações em larga escala e sua aplicação comercial tem disso dificultada por diversos fatores, como alto custo, instabilidade e procedimentos complexos.^{17,30,41}

Tiosulfato: o método de lixiviação com tiosulfato tem sido reconhecido como uma alternativa promissora à cianetação quando se trata de recuperação mais limpa e segura de metais preciosos de resíduos de PCI usando a

hidrometalurgia.^{6,30} Na lixiviação com tiosulfato ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$), a reação geral (equação 8) é:



Neste caso, há alta seletividade, porém, alto consumo de reagentes.¹⁰

O tiosulfato tem sido considerado um reagente para substituir o cianeto devido a sua alta seletividade, baixa corrosividade e baixo preço. Por causa da instabilidade em ambiente ácido, o tiosulfato sempre foi usado em ambiente alcalino ($\text{pH} = 9-10,5$).⁵ Possui muitas vantagens como: é atóxico, não corrosivo e oferece alta seletividade e o principal problema envolve o alto consumo de reagente durante a extração.⁶ Esse consumo de reagentes torna a maioria dos sistemas de tiosulfato antieconômicos, apesar de seus potenciais benefícios ambientais.^{6,10,12,30}

Em comparação com os processos pirometalúrgicos, nos processos hidrometalúrgicos há liberação de menor quantidade de gases tóxicos, menor demanda de energia, facilidade de realização em ambiente laboratorial e menores custos operacionais aliados a alta taxa de recuperação.^{1,10,12,25,33}

No entanto, os processos hidrometalúrgicos consomem grandes quantidades de reagentes químicos, e produzem um grande volume de efluentes.^{7,43} Requerem ainda uma etapa de pré-tratamento em que a trituração mecânica é seguida pelo processo de triagem para que as frações metálicas possam ser expostas às ações químicas do processo de lixiviação.^{1,30} Além disso, o uso de reagentes químicos, como cianeto e ácidos muito corrosivos, pode resultar na liberação de grandes quantidades de subprodutos tóxicos associados ao risco de impacto ambiental e, pode reduzir a aplicabilidade da hidrometalurgia.^{12,44}

A lixiviação ácida é o método mais popular e tem vantagens como: alta taxa de lixiviação e cinética rápida, porém é bastante corrosiva.^{10,30} A lixiviação com cianeto, muito utilizada para a mineração de ouro, está cada dia sendo menos usada devido a sua alta toxicidade.^{10,25} A lixiviação com tioureia, que possui baixa estabilidade, e tiosulfato, que possui cinética lenta, são métodos menos perigosos, mas não são economicamente viáveis, pois ambos requerem grandes quantidades de reagente.¹⁰

8.3. Biohidrometalurgia

A biohidrometalurgia é uma forma ecologicamente correta e econômica de tratamento de resíduos eletrônicos. Esse processo utiliza o potencial de solubilização de metais por microrganismos a partir de resíduos sólidos seguido de recuperação da solução.¹² Com menor consumo de energia e uso mínimo de produtos químicos, este processo tornou-se uma estratégia promissora e alternativa para o processo de recuperação de metais.¹ O pré-tratamento das amostras segue o mesmo procedimento utilizado quando se usa hidrometalurgia.

O processo biometalúrgico é bastante utilizado no processamento mineral como tecnologia alternativa para a recuperação de metais de muito baixo teor de minérios e concentrados.^{8,31} Além disso, tornou-se uma direção bem estabelecida para recuperação de metais, principalmente cobre e ouro, de resíduos de PCI, e é um processo favorável devido ao baixo custo de investimento, baixo impacto ambiental e baixo consumo de energia.^{8,10} Essa técnica pode ser resumida em duas etapas principais: a biolixiviação e a biossorção.¹⁰

A biolixiviação utiliza microrganismos de ocorrência natural, como grupos acidófilos de bactérias (*acidithiobacillus ferrooxidans* e *thiooxidans*) e fungos (*Penicillium*, *Aspergillus*, *Fusarium*, *Alternaria*, *Candida*), e seus produtos metabólicos para recuperar metais valiosos.⁷ É uma tecnologia promissora devido à sua relação custo-benefício, baixo consumo de energia, respeito ao meio ambiente e sustentabilidade.^{6,7} Sua principal limitação é o tempo elevado para atingir altas taxas de recuperação de metais preciosos de PCI.⁶

A biossorção é semelhante às técnicas de recuperação de metal, mas envolve materiais biológicos.¹⁰ Ocorre um processo físico-químico e independe do metabolismo microbiano, pois envolve mecanismos como quelação, coordenação, troca iônica e complexação, para a remoção de metais da solução por materiais biológicos.^{8,10} As interações físico-químicas ocorrem entre os íons metálicos e a superfície dos microrganismos.¹⁰

Normalmente existem duas maneiras diferentes de biolixiviação, a heterotrófica e a autotrófica, e três grupos de microrganismos, os procariontes quimiolitotróficos (*Acidithiobacillus thiooxidans*, *Acidithiobacillus ferrooxidans*), as bactérias heterotróficas (*Chromobacterium violaceum*, *Pseudomonas sp.*, *Bacillus megaterium*) e os fungos (*Aspergillus niger*, *Penicillium simplicissimum*).^{7,45} As bactérias oxidantes de ferro e enxofre são os microrganismos mais utilizados em processos biometalúrgicos.⁷

Os processos de biolixiviação podem ser operados de 2 maneiras: de estágio único e estágio duplo. Na técnica de estágio único, os microrganismos e os resíduos contendo metais são adicionados juntamente ao meio nutricional, assim o crescimento microbiano ocorre junto com a dissolução do metal. No entanto, na maioria dos casos, a presença de alta concentração de íons metálicos pode induzir toxicidade celular, limitar o crescimento microbiano e afetar a eficiência de recuperação. Enquanto isso, nos processos de dois estágios os microrganismos são cultivados no meio nutricional até atingir a fase estacionária do seu período de crescimento, e somente em seguida o material residual a ser reciclado é adicionado para permitir o processo de recuperação.^{1,43}

Os pesquisadores descobriram que o pH ideal para biolixiviação de Cobre de resíduos de PCIs fica na faixa entre 1,8-2,5, e que concentrações mais altas de íons Fe³⁺ levaram a taxas mais rápidas de lixiviação, alcançando 99% de extração de Cu.^{10,43} Além disso, estudos de biolixiviação

com ácido sulfúrico biológico (ácido sulfúrico produzido pelos microrganismos) foram realizados utilizando *A. thiooxidans* e sob condições ótimas, 1,6 g L⁻¹ de concentração de *biochar* (catalisador de biocarvão de madeira de carvalho), e 16 g L⁻¹ de densidade de polpa, os rendimentos de lixiviação de cobre e níquel foram de 98% e 82%, respectivamente, em um curto período de 72 horas. Conclui-se que o *biochar* é capaz de reduzir o tempo de biolixiviação em 2 dias.⁴⁶

As principais desvantagens da biolixiviação são as baixas taxas de reação, a precipitação de metais durante o tratamento, os longos tempos de reação e a toxicidade bacteriana.¹⁰ E alguns fatores são significativos durante o processo como, a escolha dos microrganismos, a área de superfície, a densidade da polpa, a seleção de precursor, a temperatura e o pH.¹

9. Conclusão

Com a análise dessa revisão sobre a situação do lixo eletrônico no mundo, é possível concluir que os resíduos eletroeletrônicos representam um grave problema de descarte em rápido crescimento em todo o mundo, e as atividades de reciclagem não acompanham a velocidade de crescimento do lixo. Assim, foi possível conhecer e identificar as melhores opções para reciclagem de resíduos de placas de circuito impresso, tanto para a recuperação de metais básicos, como também de metais preciosos.

Os processos pirometalúrgicos, que envolvem tratamentos térmicos, como, incineração e fundição, apresentam altas taxas de eficiência, porém com alto custo, alta demanda de energia e com liberação de gases tóxicos na atmosfera. Logo, não é o processo mais adequado para recuperar metais a partir de lixo eletrônico.

Os processos hidrometalúrgicos apresentam grandes vantagens em relação aos processos pirometalúrgicos, como: ausência ou níveis baixos de gases tóxicos liberados, pouca ou nenhuma poeira gerada, baixo consumo de energia, alta taxa de recuperação, condições de trabalho simples e baixo custo de equipamentos. O principal desafio do processo hidrometalúrgico é a escolha de um agente de lixiviação com alta capacidade de lixiviar metais com menor impacto ambiental e baixo custo.

A biohidrometalurgia também se apresenta como uma alternativa verde e econômica, no entanto, possui baixa taxa de lixiviação, alta seletividade e possibilidade de contaminação.

Agradecimentos

Os autores agradecem as agências de fomento CAPES (Código de Financiamento 001), CNPq (313447/2021-7) e FAPEMIG (PPM 00147-17).

Referências Bibliográficas

- Nithya, R.; Sivasankari, C.; Thirunavukkarasu, A.; Electronic waste generation, regulation and metal recovery: a review. *Environmental Chemistry Letters* **2021**, *19*, 1347. [[Crossref](#)]
- Forti, V.; Baldé, C. P.; Kuehr, R.; Bel, G.; Jinhui, L.; Khetriwal, D. S.; Linnell, J.; Magalini, F.; Nnororm, I. C.; Onianwa, P.; Ott, D.; Ramola, A.; Silva, U.; Stillhart, R.; Tillekeratne, D.; Van Straalen, V.; Wagner, M.; Yamamoto; *The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, Flows, and the circular economy potential*, 2020. [[Link](#)]
- Kaya, M.; Recovery of metals and nonmetals from electronic waste by physical and chemical recycling processes. *Waste Management* **2016**, *57*, 64. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
- Ghosh, B.; Ghosh, M. K.; Parhi, P.; Mukherjee, P. S.; Mishra, B. K.; Waste Printed Circuit Boards recycling: An extensive assessment of current status. *Journal of Cleaner Production* **2015**, *94*, 5. [[Crossref](#)]
- Hao, J.; Wang, Y.; Wu, Y.; Guo, F.; Metal recovery from waste printed circuit boards: A review for current status and perspectives. *Resources, Conservation and Recycling* **2020**, *157*, 104787. [[Crossref](#)]
- Wu, Z.; Yuan, W.; Li, J.; Wang, X.; Liu, L.; Wang, J.; A critical review on the recycling of copper and precious metals from waste printed circuit boards using hydrometallurgy. *Frontiers of Environmental Science and Engineering* **2017**, *11*, 8. [[Crossref](#)]
- Ji, X.; Yang, M.; Wan, A.; Yu, S.; Yao, Z.; Bioleaching of Typical Electronic Waste—Printed Circuit Boards (WPCBs): A Short Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **2022**, *19*, 7508. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
- Zhang, L.; Xu, Z.; A review of current progress of recycling technologies for metals from waste electrical and electronic equipment. *Journal of Cleaner Production* **2016**, *127*, 19. [[Crossref](#)]
- Verma, H. R.; Singh, K. K.; Mankhand, T. R.; Delamination mechanism study of large size waste printed circuit boards by using dimethylacetamide. *Waste Management* **2017**, *65*, 139. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
- Hsu, E.; Barmak, K.; West, A. C.; Park, A. H. A.; Advancements in the treatment and processing of electronic waste with sustainability: A review of metal extraction and recovery technologies. *Green Chemistry* **2019**, *21*, 919. [[Crossref](#)]
- Kumar, A.; Holuszko, M.; Espinosa, D. C. R.; E-waste: An overview on generation, collection, legislation and recycling practices. *Resources, Conservation and Recycling* **2017**, *122*, 32. [[Crossref](#)]
- Thakur, P.; Kumar, S.; Metallurgical processes unveil the unexplored “sleeping mines” e- waste: a review. *Environmental Science and Pollution Research* **2020**, *27*, 32359. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
- Nnorom, I. C.; Osibanjo, O.; Overview of electronic waste (e-waste) management practices and legislations, and their poor applications in the developing countries. *Resources, Conservation and Recycling* **2008**, *52*, 843. [[Crossref](#)]
- 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* **2013**, *33*, 935. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
- Tuncuk, A.; Stazi, V.; Akcil, A.; Yazici, E. Y.; Deveci, H.; Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling. *Minerals Engineering* **2012**, *25*, 28. [[Crossref](#)]
- Anwer, S.; Panghal, A.; Majid, I.; Mallick, S.; Urban mining: recovery of metals from printed circuit boards. *International Journal of Environmental Science and Technology* **2022**, *19*, 9731. [[Crossref](#)]
- Cui, J.; Zhang, L.; Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review. *Journal of Hazardous Materials* **2008**, *158*, 228. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
- Das, A.; Vidyadhar, A.; Mehrotra, S. P.; A novel flowsheet for the recovery of metal values from waste printed circuit boards. *Resources, Conservation and Recycling* **2009**, *53*, 464. [[Crossref](#)]
- Wang, X.; Gaustad, G.; Prioritizing material recovery for end-of-life printed circuit boards. *Waste Management* **2012**, *32*, 1903. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
- Zhou, Y.; Qiu, K.; A new technology for recycling materials from waste printed circuit boards. *Journal of Hazardous Materials* **2010**, *175*, 823. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
- Jing-ying, L.; Xiu-li, X.; Wen-quan, L.; Thiourea leaching gold and silver from the printed circuit boards of waste mobile phones. *Waste Management* **2012**, *32*, 1209. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
- Dutta, D.; Panda, R.; Kumari, A.; Goel, S.; Jha, M. K.; Sustainable recycling process for metals recovery from used printed circuit boards (PCBs). *Sustainable Materials and Technologies* **2018**, *17*, e00066. [[Crossref](#)]
- Vats, M. C.; Singh, S. K.; Assessment of gold and silver in assorted mobile phone printed circuit boards (PCBs): Original article. *Waste Management* **2015**, *45*, 280. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
- Tsydenova, O.; Bengtsson, M.; Chemical hazards associated with treatment of waste electrical and electronic equipment. *Waste Management* **2011**, *31*, 45. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
- Chauhan, G.; Jadhao, P. R.; Pant, K. K.; Nigam, K. D. P.; Novel technologies and conventional processes for recovery of metals from waste electrical and electronic equipment: Challenges & opportunities – A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering* **2018**, *6*, 1288. [[Crossref](#)]
- Montenegro, V.; Sano, H.; Fujisawa, T.; Recirculation of high arsenic content copper smelting dust to smelting and converting processes. *Minerals Engineering* **2013**, *49*, 184. [[Crossref](#)]
- Kang, H. Y.; Schoenung, J. M.; Electronic waste recycling: A review of U.S. infrastructure and technology options. *Resources, Conservation and Recycling* **2005**, *45*, 368. [[Crossref](#)]
- Sun, Z.; Cao, H.; Xiao, Y.; Sietsma, J.; Jin, W.; Agterhuis, H.; Yang, Y.; Toward Sustainability for Recovery of Critical Metals from Electronic Waste: The Hydrochemistry Processes. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* **2017**, *5*, 21. [[Crossref](#)]
- Valenzuela García, J. L.; Hidrometalurgia. *Hidrometalurgia* **2022**, *157*. [[Crossref](#)]
- Huy Do, M.; Tien Nguyen, G.; Dong Thach, U.; Lee, Y.; Huu Bui, T.; Advances in hydrometallurgical approaches for gold recovery from E-waste: A comprehensive review and perspectives.

- Minerals Engineering* **2023**, *191*, 107977. [[Crossref](#)]
31. Watling, H. R.; The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides - A review. *Hydrometallurgy* **2006**, *84*, 81. [[Crossref](#)]
 32. Pant, D.; Joshi, D.; Upreti, M. K.; Kotnala, R. K.; Chemical and biological extraction of metals present in E waste: A hybrid technology. *Waste Management* **2012**, *32*, 979. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
 33. Ding, Y.; Zhang, S.; Liu, B.; Zheng, H.; Chang, C. chi; Ekberg, C.; Recovery of precious metals from electronic waste and spent catalysts: A review. *Resources, Conservation and Recycling* **2019**, *141*, 284. [[Crossref](#)]
 34. Zhang, D. jun; Dong, L.; Li, Y. tong; Wu, Y.; Ma, Y. xia; Yang, B.; Copper leaching from waste printed circuit boards using typical acidic ionic liquids recovery of e-wastes' surplus value. *Waste Management* **2018**, *78*, 191. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
 35. Bas, A. D.; Deveci, H.; Yazici, E. Y.; Treatment of manufacturing scrap TV boards by nitric acid leaching. *Separation and Purification Technology* **2014**, *130*, 151. [[Crossref](#)]
 36. Yang, H.; Liu, J.; Yang, J.; Leaching copper from shredded particles of waste printed circuit boards. *Journal of Hazardous Materials* **2011**, *187*, 393. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
 37. Jadhav, U.; Hocheng, H.; Hydrometallurgical Recovery of Metals from Large Printed Circuit Board Pieces. *Scientific Reports* **2015**, *5*, 1. [[Crossref](#)]
 38. Lana, F. A.; Silveira, A. W. F.; Pinto, C. F.; Lima, A. F.; Fornazari, A. L. T.; Silva, P. P.; Fernandes, D. M.; Tonhela, M. A.; Granato, A. C. Malpass, G. R. P.; Extração de Cobre em Placas de Circuito Impresso de Celulares empregando um subproduto da indústria de fertilizantes. *Revista Virtual de Química* **2022**, *14*, 637. [[Crossref](#)]
 39. Hilson, G.; Monhemius, A. J.; Alternatives to cyanide in the gold mining industry: what prospects for the future? *Journal of Cleaner Production* **2006**, *14*, 1158. [[Crossref](#)]
 40. Syed, S.; Recovery of gold from secondary sources-A review. *Hydrometallurgy* **2012**, *115–116*, 30. [[Crossref](#)]
 41. Rao, M. D.; Singh, K. K.; Morrison, C. A.; Love, J. B.; Challenges and opportunities in the recovery of gold from electronic waste. *RSC Advances* **2020**, *10*, 4300. [[Crossref](#)]
 42. Wang, J.; Faraji, F.; Ramsay, J.; Ghahreman, A.; A review of biocyanidation as a sustainable route for gold recovery from primary and secondary low-grade resources. *Journal of Cleaner Production* **2021**, *296*, 126457. [[Crossref](#)]
 43. Li, J.; Wen, J.; Guo, Y.; An, N.; Liang, C.; Ge, Z.; Bioleaching of gold from waste printed circuit boards by alkali-tolerant *Pseudomonas fluorescens*. *Hydrometallurgy* **2020**, *194*, 105260. [[Crossref](#)]
 44. Shah, M. B.; Tipre, D. R.; Dave, S. R.; Chemical and biological processes for multi-metal extraction from waste printed circuit boards of computers and mobile phones. *Waste Management and Research* **2014**, *32*, 1134. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
 45. Xia, M.; Bao, P.; Liu, A.; Wang, M.; Shen, L.; Yu, R.; Liu, Y.; Chen, M.; Li, J.; Wu, X.; Qiu, G.; Zeng, W.; Bioleaching of low-grade waste printed circuit boards by mixed fungal culture and its community structure analysis. *Resources, Conservation and Recycling* **2018**, *136*, 267. [[Crossref](#)]
 46. Kadivar, S.; Pourhossein, F.; Mousavi, S. M.; Recovery of valuable metals from spent mobile phone printed circuit boards using biochar in indirect bioleaching. *Journal of Environmental Management* **2021**, *280*, 111642. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]