



Lixiviação Ácida de Elementos Terras Raras Presentes em Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos: Uma Breve Revisão

Acid Leaching of Rare Earth Elements Present in Waste Electrical and Electronic Equipment: A Brief Review

Rodrigo F. Gomes,^a  Matheus M. Pereira,^a  Versiane A. Leão^{b,*}

^aUniversidade Federal de Ouro Preto, Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, CEP 35400-000, Ouro Preto-MG, Brasil.

^bUniversidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Laboratório de Bio&Hidrometalurgia, CEP 35400-000, Ouro Preto-MG, Brasil.

*E-mail: versiane@ufop.edu.br

Recebido em: 19 de Junho de 2021

Aceito em: 23 de Agosto de 2021

Publicado online: 1 de Abril de 2022

The accelerated expansion of the use of electronic products has generated large amounts of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), which makes the use of management strategies based on Circular Economy (CE) essential. In this sense, the recycling of these residues is of great interest due to the presence of metals with high added value, such as Rare Earth Elements (REE). Given the above, this review aims to elucidate issues related to the management and processing of WEEE and to evaluate the main parameters that influence the leaching step of REE present in these wastes. From the critical analysis of the bibliographic survey, it was noted that fluorescent lamps, cathode-ray tubes, NbFeB magnets and NiMH batteries are widely studied, with the objective of recovering REE. However, considerable variations were observed with regard to the content of metals present in each of these residues. In short, it is important that the recovery of these metals is studied, not only due to economic aspects, but also aiming at environmentally sustainable recycling.

Keywords: Urban mining (UM); waste electrical and electronic equipment (WEEE); leaching; rare earth elements (REE).

1. Introdução

A Mineração Urbana (MU) consiste na recuperação de produtos e resíduos gerados pela atividade humana e atualmente desperta grande interesse no que diz respeito à reciclagem de metais de alto valor agregado. A MU faz parte das estratégias de gerenciamento de resíduos baseadas em princípios de Economia Circular (EC), na qual os recursos deixam de ser somente explorados e descartados e passam a ser reaproveitados em um novo ciclo. Empregando-se esta técnica, a crescente demanda por metais e a escassez de recursos minerais primários podem ser supridas.¹⁻³

A MU foi inicialmente aplicada à Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE), definidos como resíduos de equipamentos que dependem de corrente elétrica ou campos magnéticos para seu pleno funcionamento.² É importante a reciclagem desses resíduos eletrônicos, não só pela presença de metais de alto valor agregado, mas também pela existência de materiais perigosos que, ao serem descartados de maneira inadequada, podem causar danos ao meio ambiente e à saúde humana.⁴

Utilizadas em grande parte dos Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (EEE), as Placas de Circuito Impresso (PCI) apresentam em sua composição química, cerca de 16% de cobre, 4% de chumbo, 3% de ferro, 2% de níquel, 0,05% de prata e 0,03% de ouro.⁵ Além disso, apesar de divergências significativas em relação aos teores de alguns elementos, também é possível encontrar Elementos Terras Raras (ETR) em diversos tipos de PCI.^{6,7}

Os ETR são um conjunto de 17 elementos químicos, constituído pelos elementos da série dos lantanídeos, mais o escândio (Sc) e o ítrio (Y), agrupados em virtude de seus comportamentos químicos similares.^{8,9} Indispensáveis em aplicações de alta tecnologia, os ETR apresentam uma grande importância econômica, associada a um alto risco de fornecimento.¹⁰ Por esse motivo, é de extrema importância o desenvolvimento de novos processos visando a extração de ETR de recursos secundários, tais como REEE.¹¹

No que diz respeito aos ETR, lâmpadas fluorescentes, tubos de raios catódicos, ímãs de NdFeB e baterias de NiMH são exemplos de REEE largamente estudados como fonte destes metais. Ainda que diversas técnicas de processamentos metalúrgicos sejam possíveis, a hidrometalurgia tem sido preferida e empregada com sucesso na recuperação dos ETR

presentes nestes resíduos. Isso pois, esta é particularmente empregada na recuperação de metais presentes em baixos teores e na separação de elementos com propriedades químicas semelhantes.^{12,13}

Considerada a etapa mais importante do processamento hidrometalúrgico, a lixiviação objetiva a dissolução dos metais de interesse, sendo sucedida por etapas de separação sólido-líquido e purificação da solução. A lixiviação de ETR, em particular, é usualmente realizada utilizando-se ácidos minerais, tais como o clorídrico, o sulfúrico e o nítrico, por vezes associados a agentes oxidantes.¹⁴⁻¹⁶

Neste sentido, a presente revisão tem por objetivo elucidar as problemáticas relacionadas ao gerenciamento e processamento dos REEE, bem como avaliar os principais parâmetros que influenciam a etapa de lixiviação de ETR presentes nesses resíduos. Salienta-se que foi apresentada uma análise crítica acerca do tema, englobando os principais avanços recentes.

2. Mineração Urbana

O aumento da urbanização, associada à carência de recursos minerais primários, tem gerado grandes desafios às indústrias metalúrgicas em todo o mundo uma vez que a crescente demanda por metais está associada a uma oferta cada vez menor de minerais portadores destes metais.¹⁷ Com isso, a reciclagem de resíduos urbanos tem despertado grande interesse em instituições governamentais e do setor privado devido à presença de metais que apresentam alto valor agregado.³ Diante desse cenário, surge o conceito de Mineração Urbana (MU), que diz respeito a qualquer atividade ou processo de recuperação de materiais, energia, elementos de produtos e resíduos gerados pela atividade humana.^{2,17}

Segundo Arora *et al.* (2017),¹ a MU propõe estratégias de gerenciamento de resíduos baseadas em princípios de Economia Circular (EC) em substituição à economia linear. Além disso, procura-se, por meio desse conceito, maximizar o valor econômico dos resíduos gerados, promovendo assim o desenvolvimento sustentável.¹ Dessa maneira, espaços urbanos são considerados fontes de recursos que deixam de ser somente utilizados e depois descartados e passam a ser reciclados e reutilizados em um novo ciclo.^{18,19}

3. Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos

Os REEE são uma combinação de resíduos perigosos e não perigosos, que podem conter metais de alto valor agregado. Por esse motivo, caso não sejam reciclados ou reutilizados, precisam ser separados, transportados, tratados e descartados adequadamente.

Em 2014, a geração mundial de REEE atingiu 41,8 milhões de toneladas, cerca de 5,8 kg por habitante.

No ano de 2016, a geração mundial contabilizada foi de 44,7 milhões de toneladas, representando um acréscimo de 7% em relação ao volume total produzido em 2014. No Brasil, a geração desse resíduo em 2016 foi de 1,5 milhões de toneladas, sendo o segundo maior produtor de lixo eletrônico do continente americano.²⁰

Durante muito tempo, grande parte dos REEE gerados em países em desenvolvimentos como o Brasil, foram dispostos de forma inadequada em aterros. No entanto, boa parte do lixo eletrônico é considerado, atualmente, uma fonte rica em metais de alto valor agregado. Por este motivo, a coleta e o processamento de REEE visando a recuperação de metais sem o monitoramento adequado, têm sido cada vez mais frequentes.²¹

Os desafios enfrentados por países como o Brasil, no que diz respeito à gestão dos REEE, são estabelecer e cumprir as regulamentações ambientais relacionadas ao tema e, além disso, definir estratégias para melhorar a infraestrutura e o gerenciamento para o processamento destes resíduos.²²

4. Placas de Circuito Impresso

Computadores, *smartphones*, *tablets*, máquinas de lavar e chuveiros são exemplos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (EEE) em que estão presentes Placas de Circuito Impresso (PCI), sendo essas, particularmente problemáticas para reciclar uma vez que são constituídas por uma mistura de materiais poliméricos, cerâmicos e metálicos.^{23,24}

A composição das PCI é bastante heterogênea, variando de acordo com o tipo, a aplicação e o fabricante. Em geral, tem-se aproximadamente 28% de metais, 23% de materiais poliméricos e cerca de 49% de compostos cerâmicos.²⁵ Segundo Santos (2012),²⁶ as PCI correspondem a cerca de 2% do total de REEE e contêm a maior parte da fração metálica de alto valor agregado presente nesse tipo de resíduo. Vale ressaltar que, normalmente, a concentração dos metais presentes nas PCI é maior do que em minérios típicos, podendo chegar a dez (10) vezes mais, no caso dos metais preciosos, tais como ouro e prata.²⁷

Em se tratando, especificamente, da fração metálica das PCI, a qual é composta por, aproximadamente, 16% de cobre, 4% de chumbo, 3% de ferro, 2% de níquel, 0,05% de prata, 0,03% de ouro, 0,01% de paládio, e assim por diante.^{5,28} Além destes metais, de acordo com Hoffmann (1992),⁷ também é possível encontrar os Elementos Terras Raras (ETR) em alguns tipos específicos de PCI.

Até 2018, de acordo com Priya e Hait (2017),²⁹ a quantificação e a investigação do beneficiamento de ETR presentes em PCI não tinham sido extensivamente estudadas e realizadas. No entanto, Khanna *et al.* (2019)³⁰ estudaram a recuperação desses elementos e concluíram que as PCI têm potencial de se tornarem recursos secundários valiosos para a recuperação de ETR. A Tabela 1 apresenta os resultados de estudos que investigaram a presença de ETR em PCI.

No que diz respeito aos métodos de abertura química, observa-se na Tabela 1 que a maioria dos autores empregaram água régia para digerir amostras de PCI. Todavia, Priya e Hait (2017)²⁹ utilizaram uma mistura de ácido fluorídrico (HF) e ácido nítrico (HNO₃) e obtiveram as menores concentrações de terras raras dentre os estudos referenciados. Por esse motivo, uma hipótese é que a presença de ácido clorídrico (HCl) pode ter influência considerável na digestão de amostras de PCI para a quantificação de ETR.

Priya e Hait (2017)²⁹ caracterizaram, em seu estudo, amostras de PCI oriundas de 16 diferentes EEE, incluindo aparelhos celulares e computadores *desktop* e *laptop*. Os autores examinaram dois (2) fabricantes diferentes para cada um dos EEE caracterizados, referidas na Tabela 1 como (1) e (2). Amostras de 0,2 g foram dissolvidas por digestão *ácida* assistida por micro-ondas, em uma mistura de 9 mL de HNO₃ e 3 mL de HF, a 180 °C. Os resultados do trabalho mostraram que, apesar de serem encontrados 15 ETR, os mais abundantes foram escândio (Sc) e cério (Ce), em concentrações máximas iguais a 32,84 mg kg⁻¹ e 8,80 mg kg⁻¹, respectivamente.

No trabalho de Korf *et al.* (2019),³¹ amostras contendo 0,2 g de PCI foram digeridas em água régia (7,5 mL de HCl e 2,5 mL de HNO₃), por meio do método de digestão por micro-ondas, com temperatura máxima de 250 °C e 30 min de ensaio. Após a determinação dos ETR por meio das técnicas de Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES) e Espectrometria de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS), os autores concluíram que os resultados obtidos para a análise por ICP-OES foram suficientemente precisos e exatos para a maioria dos elementos investigados. Vale

ressaltar que, em geral, a técnica de ICP-MS é apropriada para a determinação de metais presentes em baixas frações de massa.

Buechler *et al.* (2020)³² também utilizaram digestão por micro-ondas para caracterizar quimicamente amostras provenientes de PCI de computadores *desktop*. Para isso, amostras de 0,5 g de PCI e 12 mL de água régia foram aquecidas a 250 °C por 80 min. Os resultados obtidos pelos autores mostraram que diversos ETR foram mensurados em ICP-OES, sendo o neodímio (Nd) observado em concentração máxima de 155 mg kg⁻¹.

De acordo com Korf *et al.* (2019)³¹ e Gonzalez-Baez (2019),⁶ as matrizes das PCI são extremamente complexas e podem variar consideravelmente dependendo da aplicação, da origem e do ano de fabricação. A vista disso, podem haver divergências significativas em relação à concentração medida de alguns elementos presentes nas PCI. Neste sentido, a heterogeneidade de amostras de PCI em relação aos ETR foi evidenciada na Tabela 1, uma vez que os resultados obtidos pelos diferentes autores se mostraram discrepantes para vários desses elementos.

Em se tratando do elemento lantânio (La), as concentrações encontradas por Gonzales-Baez (2019)⁶ e Arshadi (2015)³³ foram de respectivamente, 0,2 e 0,01%, valores duas ordens de grandezas superiores aos encontrados pelos demais autores referenciados na Tabela 1. Vale ressaltar que o método empregado por Arshadi (2015)³³ consistiu na adição de 1 g de PCI de telefones celulares a um frasco *Erlenmeyer* de 250 mL, para digestão metálica em 40 mL de água régia. A solução foi mantida em repouso por 24 h antes da centrifugação, a 500 min⁻¹, durante 15 min. Em contrapartida, as PCI investigadas por Gonzales-Baez (2019)⁶ eram provenientes de diversos EEE e sua digestão

Tabela 1. Levantamento bibliográfico de estudos que determinaram Elementos Terras Raras (ETR) em Placas de Circuito Impresso (PCI)

Tipo de PCI	Abertura Química	Técnica de Análise	Concentração (mg kg ⁻¹)													Ref.	
			Ce	Dy	Er	Eu	Gd	Ho	La	Nd	Pr	Sc	Sm	Tm	Yb		Y
Computador <i>desktop</i> (1) ¹			6,78	0,26	0,12	1,04	1,66	0,042	4,92	1,64	0,83	19,71	0,42	0,055	0,12	2,15	
Computador <i>desktop</i> (2) ¹			8,80	0,20	0,14	0,88	1,16	0,042	4,54	2,10	0,65	25,23	0,37	0,022	0,16	1,98	
Computador <i>laptop</i> (1)	3 mL de HNO ₃ para 1 mL de HF	ICP-MS ³	3,52	0,20	0,075	2,15	1,35	0,05	1,55	1,06	0,30	14,62	0,26	0,011	0,08	0,08	29
Computador <i>laptop</i> (2)			4,81	0,31	0,090	1,24	0,90	0,10	2,62	1,22	0,39	12,75	0,26	0,013	0,10	0,10	
Celular (1)			2,50	0,10	0,043	2,31	1,28	0,05	1,35	0,90	0,21	28,14	0,17	0,006	0,04	0,49	
Celular (2)			3,75	0,23	0,084	2,07	0,58	0,02	2,50	2,47	0,34	32,84	0,21	0,012	0,09	1,71	
Computador	Água régia ²	ICP-MS	18,60	NM ⁶	NM	0,56	6,48	NM	15,60	104,00	18,90	NM	2,15	NM	NM	NM	31
		ICP-OES ³	24,00	NM	NM	NM	NM	NM	11,90	9,43	NM	NM	NM	NM	NM	NM	
		D ⁴	13,33	D	ND ⁵	18,92	D	13,14	155,00	7,69	11,16	ND	D	1,27	ND	32	
Diversos EEE	Água régia + H ₂ O ₂	ICP-OES	D	D	NM	NM	NM	D	2000,00	100,00	NM	D	NM	NM	NM	100,00	6
Celular	NM		81,00	NM	NM	NM	NM	NM	987,00	NM	NM	2,90	NM	NM	NM	120,00	33

¹Os algarismos (1) e (2) foram utilizados por Priya e Hait (2017)²⁹ para diferenciar PCI provenientes de REEE de marcas distintas; ²Água régia diz respeito a uma mistura de 1/3 em volume de ácido nítrico e ácido clorídrico, respectivamente; ³Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES). Espectrometria de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS); ⁴D: detectado, mas não mensurado; ⁵ND: não detectado; ⁶NM: não mencionado.

em água régia foi assistida por micro-ondas, a 195 °C, por 30 min, a uma potência de 1000 W.

As concentrações de elementos como ítrio (Y), neodímio (Nd), cério (Ce), gadolínio (Gd) e praseodímio (Pr) também apresentaram grandes variações nos estudos citados. No entanto, observa-se por meio da Tabela 1 que a variação da concentração dos ETR não tem relação direta com o tipo de PCI analisada, uma vez que Priya e Hait (2017)²⁹ obtiveram valores próximos ao analisarem PCI de computadores *desktop*, *laptop* e celulares. Ainda, comparando-se as concentrações de lantânio (La) em PCI de celulares encontradas por Arshadi (2015)³³ e Priya e Hait (2017),²⁹ 987 e 2,50 ppm, respectivamente, nota-se uma grande divergência nos resultados encontrados para o mesmo tipo de PCI.

5. Processamento Metalúrgico de PCI

A presença de metais preciosos e ETR torna as PCI uma fonte importante para a reciclagem de metais. No entanto, a diversidade de materiais presentes faz com que o processamento desse tipo de resíduo, visando a recuperação de metais, seja complexo.³⁴ À vista disso, ainda são poucas as empresas tecnologicamente preparadas e ambientalmente capacitadas a operar no ramo da reciclagem de PCI no Brasil.³⁵

5.1. Processamento hidrometalúrgico

A hidrometalurgia é o conjunto de técnicas empregadas para a produção de metais em meio aquoso. A mais importante operação unitária é a lixiviação, que consiste na dissolução dos metais de interesse presentes no material sólido. Após a solubilização do metal, a solução é submetida a operações em diferentes meios líquidos (ácidos, básicos, neutros, oxidantes, entre outros), tais como precipitação, extração por solventes e adsorção, com o objetivo de separar e concentrar o metal de interesse. Vale ressaltar que a hidrometalurgia é particularmente empregada na recuperação de metais presentes em baixos teores e na separação de elementos com propriedades químicas semelhantes.^{36,37}

Em relação ao processamento hidrometalúrgico de PCI, as etapas de pré-tratamento como fragmentação e cominuição são indispensáveis. Isso pois, o conteúdo metálico precisa estar acessível ao ataque químico no menor período de tempo.⁴ Podem-se citar como desvantagens desse processo o grande volume de reagentes necessários para a dissolução dos metais de interesse e a consequente geração de efluentes líquidos, na maioria das vezes corrosivos e/ou tóxicos.¹⁶

Segundo Veit (2005),¹³ ainda que parcialmente criticada, a hidrometalurgia tem sido utilizada com sucesso na recuperação de metais presentes em PCI. Isso se deve às vantagens desse processo, tais como: menor custo, alta taxa

de recuperação de metais e menor impacto ambiental no que diz respeito à poluição atmosférica.^{15,16}

6. Elementos Terras Raras

Os ETR são um conjunto de 17 elementos químicos compostos pela série dos lantanídeos mais o Escândio (Sc) e o Ítrio (Y). Os 15 elementos que compõem a série dos Lantanídeos são: Lantânio (La), Cério (Ce), Praseodímio (Pr), Neodímio (Nd), Promécio (Pm), Samário (Sm), Európio (Eu), Gadolínio (Gd), Térbio (Tb), Disprósio (Dy), Hólmio (Ho), Érbio (Er), Túlio (Tm), Ytérbio (Yb) e Lutécio (Lu), com números atômicos de 57 a 71, respectivamente.⁸

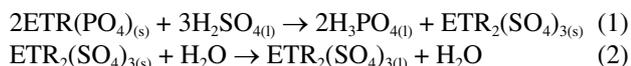
Segundo Abrão (1994),³⁸ as propriedades semelhantes dos ETR são explicadas pelo fenômeno da “contração lantanídica”, a qual consiste na diminuição dos raios atômicos e iônicos com o aumento do número atômico. Todos os lantanídeos apresentam valência 3+, entretanto, alguns deles também podem apresentar os estados de oxidação 2+ e 4+. Os elementos escândio (Sc) e ítrio (Y) também possuem valência 3+ e sua presença no grupo dos ETR é justificada pelo comportamento químico similar.⁹

Os ETR são de grande interesse para a sociedade uma vez que são indispensáveis em várias aplicações de alta tecnologia como: catalisadores, ligas de metais de transição, ímãs permanentes, fibras óticas, em aplicações nucleares, supercondutores, entre outros. No entanto, vale ressaltar que alguns desses metais, tais como lantânio (La) e samário (Sm), podem apresentar efeitos tóxicos sobre alguns organismos terrestres.³⁹⁻⁴¹

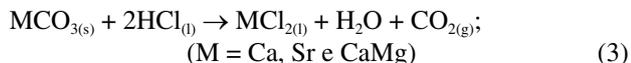
A China produziu em 2019, 132.000 toneladas de óxidos de ETR, cerca de 62% da produção mundial, apesar de deter menos de 40% das reservas. Além disso, o país domina tecnologias relacionadas às etapas de extração e separação de ETR presentes em licores nítricos e clorídricos.⁴² Por outro lado, apesar de possuir grandes reservas de ETR, o Brasil representa menos de 0,5% da produção mineral mundial.

7. Lixiviação de Elementos Terras Raras

A lixiviação de ETR presentes nos minerais bastnasita, xenotima e monazita, é complexa e necessita de condições agressivas, ácidas ou alcalinas.⁴³ No caso da lixiviação dos minérios portadores de fosfatos de ETR (monazita e xenotima), o tratamento químico clássico consiste na decomposição por meio de cura ácida, na qual o concentrado é mantido entre 200 e 300 °C, por cerca de 2 h, em contato com H₂SO₄, a 98%. Após a conversão dos fosfatos de ETR em sulfatos (sulfatação), o material é efetivamente lixiviado em água, onde os sulfatos de ETR são dissolvidos, enquanto as demais espécies permanecem insolúveis, conforme apresentado nas Equações 1 e 2.⁴⁴



A bastnasita, por sua vez, é um fluorcarbonato de ETR que, comumente é encontrada acompanhada por outros carbonatos minerais como a calcita, a aragonita, a estroncianita e a dolomita. Por esse motivo, o minério é previamente lixiviado com HCl diluído (cerca de 35% em peso) para a dissolução preferencial dos carbonatos metálicos, segundo a Equação 3.⁴⁵



Em seguida, o produto sólido é lixiviado com HCl concentrado, com o objetivo de decompor a bastnasita conforme a Equação 4. Posteriormente, uma vez que grande parte dos fluoretos de terras raras são insolúveis em HCl, o mineral é tratado com hidróxido de sódio (NaOH), para que sejam formados hidróxidos de terras raras (Equação 5). A seguir, estes são dissolvidos em solução de HCl. Vale ressaltar que existem processos alternativos, nos quais após a dissolução dos carbonatos, a bastnasita é diretamente encaminhada ao tratamento alcalino com NaOH e em seguida lixiviada com HCl.^{43,45}



O risco potencial de desabastecimento e a grande importância econômica incentivaram a realização de pesquisas e o desenvolvimento de novos processos, visando a obtenção de ETR de fontes secundárias, tais como rejeitos de minas e sucata eletrônica. No entanto, atualmente, não existem tecnologias consolidadas para a extração de ETR de fontes secundárias.¹¹

Neste sentido, realizou-se um levantamento bibliográfico contemplando inúmeras pesquisas relacionadas à lixiviação de ETR presentes em diversos tipos de REEE. Diante disso, a Tabela 2 resume as condições de lixiviação empregadas, bem como o tipo de REEE testados, o teor inicial de ETR e o rendimento da lixiviação. Em seguida, a extração de ETR de diferentes REEE foi detalhada.

7.1. Lâmpadas fluorescentes

As lâmpadas fluorescentes são produzidas a partir de pós luminescentes, sendo esses classificados em três (3) grupos: os fósforos vermelhos $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$ (óxido de ítrio dopado com európio); os fósforos verdes $\text{LaPO}_4:\text{Ce}^{3+}$, Tb^{3+} , Pr^{3+} , $\text{CeMgAl}_{11}\text{O}_{19}:\text{Tb}^{3+}$ e os fósforos azuis $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}^{2+}$. No entanto, os fósforos vermelhos apresentam o maior valor intrínseco para a reciclagem.^{58,59} Além disso, uma vez que são compostos por óxido de terras raras, os fósforos vermelhos são facilmente lixiviados em concentrações relativamente

baixas de ácido e, por esse motivo, grande parte dos trabalhos encontrados na literatura visam o tratamento e a recuperação dos ETR presentes nestes REEE.⁴⁷

Michelis *et al.* (2011)⁴⁶ estudaram a lixiviação de ítrio contido em pós fluorescentes empregando diversos agentes químicos e concluíram que a lixiviação básica com NH_3 resultou em baixos valores de extração de ítrio, enquanto as extrações alcançadas utilizando-se HCl e H_2SO_4 foram satisfatórias. Conforme apresentado na Tabela 2, empregando 3 mol L^{-1} de HCl, 150 g L^{-1} de sólidos, temperatura de $65 \text{ }^\circ\text{C}$ e tempo de 60 min, os autores lixiviaram 90% do ítrio presente na amostra. Por outro lado, utilizando-se 2 mol L^{-1} de H_2SO_4 , 200 g L^{-1} de sólidos, temperatura de $90 \text{ }^\circ\text{C}$ e tempo de 180 min obtiveram 85% de extração do metal. A lixiviação com H_2SO_4 foi considerada vantajosa, uma vez que houve redução na solubilização de impurezas presentes nos pós luminescentes, tais como cálcio, chumbo e bário, resultando em processos posteriores de purificação mais simples.

Yang *et al.* (2013)⁴⁸ verificaram que ítrio (Y) e európio (Eu) foram dissolvidos prontamente em soluções ácidas, no entanto, a lixiviação de outros ETR exigiu condições mais severas, como aplicação de altas temperaturas para a dissolução completa. Os autores avaliaram a lixiviação dos dois metais por meio de diferentes ácidos (clorídrico, sulfúrico e nítrico) e alcançaram porcentagens de extração de ítrio e európio superiores a 85%, independente do ácido utilizado. Para tal, as condições empregadas foram de 5 mol L^{-1} de HCl, H_2SO_4 ou HNO_3 , 50 g L^{-1} de sólidos, temperatura $70 \text{ }^\circ\text{C}$ e tempo de 360 min.

Wang *et al.* (2011)⁴⁷ lixiviaram ETR a partir de pós de fósforos verdes presentes em lâmpadas fluorescentes utilizando peróxido de hidrogênio em meio ácido. Os resultados apontaram que 90% do conteúdo de ETR foi lixiviado empregando-se as seguintes condições: 4 mol L^{-1} de HCl, $4,4 \text{ g L}^{-1}$ de H_2O_2 , 100 g L^{-1} de sólidos, temperatura de $60 \text{ }^\circ\text{C}$ e tempo de 60 min.

7.2. Tubos de raios catódicos

Os tubos de raios catódicos eram empregados, principalmente, em televisores coloridos e monitores de computador e foram amplamente substituídos por monitores de *Liquid Crystal Display* (LCD), *Light Emitting Diode* (LED) e telas de plasma.^{60,61} Assim como as lâmpadas fluorescentes, os tubos de raios catódicos são constituídos por pós fluorescentes, no entanto, os ETR são provenientes apenas dos fósforos vermelhos, compostos por oxissulfetos de ítrio dopados com európio ($\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Eu}^{3+}$).⁶²

Resende e Morais (2010)⁴⁹ estudaram o uso do H_2SO_4 na lixiviação de ETR presentes em pós de sucatas de monitores de computador. Os rendimentos de dissolução de ítrio (Y) e európio (Eu) foram de 96% nas seguintes condições: concentração de H_2SO_4 de $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, densidade de polpa de 200 g L^{-1} , temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e tempo de 90 min.

Outros estudos relacionados à reciclagem de resíduos de tubos de raios catódicos relatam que a presença de compostos

Tabela 2. Levantamento bibliográfico de estudos que investigaram a lixiviação de ETR presentes em REEE

Tipo de REEE	Condições de lixiviação					Rendimento da lixiviação	Ref	
	Teor de metal (% p/p) ¹	Lixiviante	Densidade de polpa	Temperatura	Tempo			
Lâmpadas fluorescentes	Y (7,2%)	2,0 mol L ⁻¹ H ₂ SO ₄	200 g L ⁻¹	90 °C	180 min	Y (85,0%)	46	
		3,0 mol L ⁻¹ HCl	150 g L ⁻¹	65 °C	60 min	Y (90,0%)		
	Y (23,2%) Ce (2,4%) Eu (1,8%) Outros ETR (0,5 %)	4,0 mol L ⁻¹ HCl 4,4 g L ⁻¹ H ₂ O ₂	100 g L ⁻¹	60 °C	60 min	ETR (89,9%)	47	
	Y (17,8%) La (4,1%)	5,0 mol L ⁻¹ HCl				Y (93,3%) Eu (89,2%)	48	
	Ce (2,4%) Pr (1,2%) Eu (1,1%) Tb (0,6%)	5,0 mol L ⁻¹ HNO ₃	50 g L ⁻¹	70 °C	360 min	Y (91,6%) Eu (85,7%)		
		5,0 mol L ⁻¹ H ₂ SO ₄				Y (98,4%) Eu (87,6%)		
	Y (17,0%) Eu (0,8%)	0,5 mol L ⁻¹ H ₂ SO ₄	200 g L ⁻¹	25 °C	90 min	Y (96,0%) Eu (96,0%)		49
	Y + Eu (30,2%)	3,0 mol L ⁻¹ H ₂ SO ₄ 58,0 g L ⁻¹ H ₂ O ₂	50 g L ⁻¹	55 °C	60 min	Y + Eu (99,0%)		50
	Y (3,4%) Eu (0,2%)	0,4 mol L ⁻¹ H ₂ SO ₄ 217,5 g L ⁻¹ H ₂ O ₂	23 g L ⁻¹	80 °C	20 min	Y (95,0%) Eu (95,0%)	51	
	Nd (35,1%) Dy (1,1%)	3,0 mol L ⁻¹ HCl	100 g L ⁻¹	25 °C	120 min	Nd (90,3%) Dy (95,5%)	52	
Nd (19,1%) Dy (4,2%)	3,0 mol L ⁻¹ H ₂ SO ₄	110 g L ⁻¹	70 °C	240 min	Nd (84,4%) Dy (85,2%)	53		
Nd (31,3%)	6,0 mol L ⁻¹ HNO ₃	20 g L ⁻¹	27 °C	120 min	Nd (100%)	54		
Baterias de NiMH	La (2,7%) Nd (4,5%) Sm (6,2%) Pr (2,3%) Ce (2,6%)	2,0 mol L ⁻¹ H ₂ SO ₄	100 g L ⁻¹	75 °C	120 min	La (69,5%) Nd (98,1%) Sm (98,4%) Pr (95,5%) Ce (89,4%)	55	
	Ce (10,4%) La (6,7%) Nd (3,1%)	1,0 mol L ⁻¹ H ₂ SO ₄	25 g L ⁻¹	90 °C	240 min	Ce (99,6%) La (98,8%) Nd (97,5%)	12	
	Ce (11,8%) La (7,6%) Nd (3,9%) Pr (1,0%)	1,2 mol L ⁻¹ HCl	100 g L ⁻¹	70 °C	100 min	ETR (95,2%)	56	
	Sc (23,6 ppm) La (3,9 ppm) Ce (7,8 ppm) Nd (1,9 ppm)	Biolixiviação ² Cultura mista	7,5 g L ⁻¹	30 °C	18 dias	Sc (31%) La (27%) Ce (27%) Nd (24%)	57	

¹Teor de metal (% p/p): teores em porcentagem peso dos metais de interesse em relação ao conteúdo metálico total de cada REEE; ²Biolixiviação realizada empregando cultura mista de *Acidithiobacillus ferrooxidans* e *Acidiphilium acidophilum*

sulfetados causa problemas durante a etapa de lixiviação, uma vez que o tratamento por meio de H₂SO₄ concentrado leva à formação de H₂S e SO₂.⁶³ Por esse motivo, misturas de H₂SO₄ e H₂O₂ foram empregadas por Miskufova *et al.* (2018) e Yin *et al.* (2018),^{50,51} com objetivo de minimizar a formação de gases tóxicos durante a etapa de lixiviação. De acordo com Yin *et al.* (2018), a utilização de H₂O₂ pode aumentar a eficiência de lixiviação e evitar a formação de H₂S, transformando o sulfeto (S²⁻) em enxofre elementar (S⁰).⁵⁰

Os resultados obtidos por Yin *et al.* (2018) evidenciaram que 99% do conteúdo de ítrio e európio presentes na amostra

de fósforos de tubos de raios catódicos foram lixiviados nas seguintes condições: 3 mol L⁻¹ de H₂SO₄, 58 g L⁻¹ de H₂O₂, 55 °C e 60 min.⁵⁰ De maneira similar, Miskufova *et al.* (2018) utilizaram 0,4 mol L⁻¹ de H₂SO₄, 217,5 g L⁻¹ de H₂O₂, temperatura de 80 °C e tempo de 20 min e alcançaram 95% de eficiência de lixiviação de ítrio (Y) e európio (Eu).⁵¹

7.3. Imãs NbFeB

Imãs de NdFeB também foram largamente estudados visando a recuperação de ETR, em especial neodímio e

disprósio. Rabatho *et al.* (2013)⁵² analisaram em seu trabalho as fases presentes nesse resíduo e concluíram que $\text{Nd}(\text{OH})_3$ e Fe_2O_3 eram as principais fases presentes. Ademais, análises químicas mostraram um conteúdo de 35,1% em peso de neodímio (Nd), 29,5% em peso de ferro (Fe), 1,1% em peso de disprósio (Dy) e 0,5% em peso de boro (B).

Rabatho *et al.* (2013)⁵² estudaram a lixiviação de neodímio e disprósio utilizando $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, H_3PO_4 , HNO_3 e HCl. Os resultados mostraram que a eficiência de lixiviação utilizando $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ e H_3PO_4 foi menor que 5%, enquanto os ácidos HCl e HNO_3 possibilitaram rendimentos de lixiviação superiores a 80%. Ao empregarem 3 mol L⁻¹ de HCl, 100 g L⁻¹ de sólidos, temperatura de 25 °C e tempo de 120 min, as extrações de neodímio e disprósio atingiram respectivamente 90,3 e 35,5%. Por outro lado, com a utilização de 3 mol L⁻¹ HNO_3 nas mesmas condições, foi lixiviado 84,4% do conteúdo de neodímio e 85,2% do conteúdo de disprósio.

Rabatho *et al.* (2013)⁵² investigaram também o emprego de H_2O_2 na lixiviação de ETR na presença de HCl e HNO_3 e concluíram que a eficiência de lixiviação de neodímio e disprósio poderia atingir valores superiores a 95%. No entanto, ao utilizarem HNO_3 , obtiveram baixos valores de extração para o ferro, principal contaminante desse resíduo, por esse motivo o mesmo foi considerado o melhor reagente a ser empregado.

Lee *et al.* (2013)⁵⁴ avaliaram a lixiviação de neodímio a partir de sucata magnética de ímãs NdFeB utilizando os seguintes lixivantes: HCl, H_2SO_4 , HNO_3 e NaOH. Os resultados apontaram que a lixiviação com NaOH não alcançou valores significativos de recuperação de neodímio. Em alternativa, empregando 6 mol L⁻¹ de HCl, 20 g L⁻¹ de sólidos e temperatura de 27 °C, aproximadamente 100% do conteúdo de neodímio foi lixiviado em 15 minutos de ensaio. Nas mesmas condições de densidade de polpa, temperatura e tempo, extrações próximas a 100% também foram alcançadas utilizando 3 mol L⁻¹ de H_2SO_4 . Vale ressaltar que, Lee *et al.* (2013)⁵⁴ não avaliaram o efeito do tempo na lixiviação com HNO_3 . No entanto, os resultados obtidos no estudo revelaram que 100% do neodímio foi lixiviado com 6 mol L⁻¹ de HNO_3 , 20 g L⁻¹ de sólidos, temperatura de 27 °C e tempo de 120 min.

A lixiviação de neodímio presente em resíduos de ímã permanente de NdFeB também foi estudada por Yoon *et al.* (2014).⁵³ Segundo os autores, o conteúdo de neodímio foi completamente solubilizado empregando as seguintes condições: tempo de 240 min, densidade de polpa de 110 g L⁻¹, temperatura de 70 °C e concentração de H_2SO_4 de 3 mol L⁻¹.

7.4. Baterias NiMH

As baterias de níquel-hidreto metálico (NiMH) são um dos REEE com maior potencial de reciclagem de ETR, uma vez que cerca de 10 a 15% do conteúdo metálico é composto por lantânio, cério, praseodímio, neodímio e

samário, na forma de hidróxidos, óxidos ou metais.⁶⁴ No estudo realizado por Yang *et al.* (2014),⁵⁶ foi investigada a lixiviação de baterias de NiMH utilizando HCl como lixivante. Os resultados apontaram que 95,2% do conteúdo total de ETR foi lixiviado aplicando as seguintes condições: concentração de HCl de 1,2 mol L⁻¹, densidade de polpa de 100 g L⁻¹, temperatura de 70 °C e tempo de 100 min.

Meshram *et al.* (2016),⁵⁵ sob outra perspectiva, avaliaram o emprego de H_2SO_4 como lixivante e os resultados evidenciaram que 3 mol L⁻¹ de H_2SO_4 foram capazes de lixiviar 69,5% de lantânio, 98,1% de neodímio, 98,4% de samário, 95,5% de praseodímio e 89,4% de cério, empregando 100 g L⁻¹ de sólidos, temperatura de 75 °C e tempo de 120 min. De forma análoga, Ahn *et al.* (2020)¹² alcançaram eficiências de lixiviação de 99,6% de cério, 98,8% de lantânio e 97,5% de neodímio, utilizando concentração de H_2SO_4 de 1 mol L⁻¹, 25 g L⁻¹ de sólidos e temperatura de 25 °C, em 240 min de ensaio.¹²

7.5. Placas de circuito impresso

A lixiviação de ETR presentes em PCI não foi extensivamente estudada até o ano de 2021. No entanto, Priya e Hait (2020)⁵⁷ empregaram a técnica de biolixiviação para recuperar escândio, lantânio, cério e neodímio presentes em PCI de computadores. Os resultados apresentados pelos autores mostraram que 31% de escândio, 27% de lantânio, 27% de cério e 24% de neodímio foram recuperados utilizando uma cultura mista de *Acidithiobacillus ferrooxidans* e *Acidiphilium acidophilum*, empregando 7,5 g L⁻¹ de sólidos, temperatura de 30 °C e tempo de 18 dias.

O emprego de peróxido de hidrogênio como agente oxidante foi observado nos estudos realizados por Wang *et al.* (2012),⁴⁷ Yin *et al.* (2018)⁵⁰ e Miskufova *et al.* (2018).⁵¹ Entretanto, os resultados encontrados pelos autores evidenciaram que, visando a lixiviação de ETR, a utilização de agentes oxidantes é dispensável, uma vez que não foram observados aumentos significativos nos valores de rendimentos da lixiviação.

Os valores verificados de concentração dos agentes lixivantes ácido clorídrico, ácido nítrico e ácido sulfúrico na Tabela 2 estão compreendidos entre 0,4 mol L⁻¹ e 6 mol L⁻¹. Resende e Morais (2010)⁴⁹ investigaram a lixiviação de tubo de raios catódicos e alcançaram rendimentos de 96,0% de ítrio e 96,0% de európio, utilizando 0,5 mol L⁻¹ de H_2SO_4 . Em contrapartida, ao lixivarem o mesmo REEE, com concentração de 3,0 mol L⁻¹ de H_2SO_4 , Yin *et al.* (2018)⁵⁰ lixivaram 99,0% do conteúdo de ítrio e európio. Ademais, valores de concentração de ácidos minerais acima de 2 mol L⁻¹ aproximadamente, são considerados altos e por isso não são usualmente empregados.

No que se refere às condições de densidade de polpa empregadas, apesar de serem observados valores abaixo de 100 g L⁻¹, estes não comumente utilizados. Isso pois, para ETR presentes em baixos teores, baixas densidades de polpa

podem originar erros significativos, no que diz respeito à variância dos resultados. Além disso, baixas densidades de polpa podem impossibilitar o processamento industrial e economicamente viável de REEE.

As temperaturas empregadas pelos autores variaram entre temperaturas próximas a ambiente e 90 °C. No entanto, os estudos realizados por Lee *et al.* (2013),⁵⁴ Rabatho *et al.* (2013)⁵² e Resende e Morais (2010)⁴⁹ utilizaram temperaturas de, respectivamente 27, 25 e 25 °C e alcançaram rendimentos de lixiviação superiores a 90%. Em relação ao tempo de lixiviação, ainda que tenham sido observados tempos menores que 60 minutos e maiores que 240 minutos, estes não são usualmente empregados em estudos de lixiviação ou processos indústrias.

8. Considerações Finais

Diante do aumento da urbanização e da escassez de recursos minerais primários, o grande volume de geração de REEE tem despertado grande interesse em instituições governamentais e do setor privado, com o intuito de maximizar o valor econômico desses resíduos, uma vez que há presença de metais que apresentam alto valor agregado, tais como ETR e metais preciosos e básicos.

De posse do levantamento bibliográfico realizado, observou-se que lâmpadas fluorescentes, tubos de raios catódicos, ímãs NbFeB e baterias NiMH são REEE largamente estudados, com o objetivo de recuperar os ETR. No entanto, são notadas variações consideráveis no que diz respeito ao teor dos metais presentes em cada um desses resíduos. Em relação às PCI, foram observados baixos teores de ETR, entretanto é importante que a recuperação desses metais seja estudada, não só devido aos aspectos econômicos, mas também visando a reciclagem ambientalmente sustentável de PCI.

Em suma, os apanhados dessa revisão evidenciaram a necessidade da elucidação de uma rota ambientalmente amigável para a lixiviação de ETR presentes em REEE, com potencial aplicação industrial. Salienta-se que esse resíduo se mostra promissor, possibilitando que novas rotas hidrometalúrgicas sejam estudadas, não só no que se refere aos ETR, mas também a outros metais.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), bem como o apoio das agências financiadoras CAPES, CNPq, FINEP e FAPEMIG. As bolsas CAPES ofertadas ao Rodrigo Ferreira Gomes e Matheus Mello Pereira e a bolsa CNPq concedida ao Versiane Albis Leão são particularmente apreciadas. Deve ressaltar que esta pesquisa não recebeu nenhum outro subsídio específico de agências de fomento dos setores público, comercial ou sem fins lucrativos.

Referências Bibliográficas

1. Arora, R.; Pateroka, K.; Banerjee, A.; Salujab, S.; Potential and relevance of urban mining in the context of sustainable cities. *IIMB Management Review* **2017**, *29*, 210. [[Crossref](#)]
2. Cossu, R.; Williams, I.; Urban mining: Concepts, terminology, challenges. *Waste Management* **2015**, *45*, 1. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
3. Tesfaye, F.; Lindberg, D.; Hamuyuni, J.; Taskinen, P.; Hupa, L.; Improving urban mining practices for optimal recovery of resources from e-waste. *Minerals Engineering* **2017**, *111*, 209. [[Crossref](#)]
4. Oliveira, P.; Tese de doutorado, Universidade Técnica De Lisboa, 2012. [[Link](#)]
5. Veit, H.; Pereira, C.; Bernardes, A.; Using mechanical processing in recycling printed wiring boards. *The Journal of The Minerals, Metals and Materials Society* **2002**, *54*, 45. [[Crossref](#)]
6. Gonzalez-Baez, A.; Pantoja Munoz, L.; Garelick, H.; Purchase, D.; Characterisation of Rare Earth Elements in Waste Printed Circuit Boards (WPCBs) and their bioleaching potential. In: 6th International Conference on Environmental Science and Technology; 2019, Rhodes, Greece 2019. [[Link](#)]
7. Hoffmann, J.; Recovering precious metals from electronic scrap. *The Journal of The Minerals, Metals and Materials Society* **1992**, *44*, 43. [[Crossref](#)]
8. IUPAC. Nomenclature of Inorganic Chemistry - IUPAC Recommendations. *Chemistry International* 2005, *27*, 51. [[Link](#)]
9. Voncken, J.; The ore minerals and major ore deposits of the Rare Earths. In: *The Rare Earth Elements - An Introduction*; 2016, USA: SpringerBriefs In Earth Sciences 2016, ,15.
10. European Commission. Critical Raw Materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on Defining Critical Raw Materials. Enterprise and Industry; Bruxelas, Bélgica. 2010. [[Link](#)]
11. Peelman, S.; Sun, Z.; Sietsma, J.; Yang, Y.; In *Rare Metal Technology*, Alam, S.; Kim, H.; Neelameggham, N. R.; Ouchi, T.; Oosterhof, H. (Eds), Springer International Publishing: Melkweg, 2016, cap 2. [[Crossref](#)]
12. Ahn, K.; Shim, H.; Kim, D.; Swain, B.; Valorization of waste NiMH battery through recovery of critical rare earth metal: A simple recycling process for the circular economy. *Waste Management* **2020**, *104*, 254. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
13. Veit, H.; Tese de doutorado, Universidade do Rio Grande do Sul, 2005. [[Link](#)]
14. Innocenzi, V.; Treatment of spent fluorescent lamps, cathode-ray tubes, and spent catalysts by hydrometallurgical procedures. In: *Waste Electrical and Electronic Equipment Recycling*. L' Aquila; 2018, Italy **2018**, *1*. [[Crossref](#)]
15. Tuncuk, A.; Stazi, V.; Akcil, A.; Yazici, E.; Deveci, H.; Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling. *Minerals Engineering* **2012**, *25*, 28. [[Crossref](#)]
16. Sum, E.; The recovery of metals from electronic scrap. *The Journal of The Minerals, Metals e Materials Society* **1991**; *43*, 53. [[Crossref](#)]
17. Baccini, P.; Brunner, P.; *Metabolism of the Anthroposphere: Analysis, Evaluation, Design*, 2. ed., The MIT Press: Cambridge, 2012.

18. Brunner, P.; Urban mining: A contribution to reindustrializing the city. *Journal of Industrial Ecology* **2011**, *15*, 339. [Crossref]
19. Cossu, A.; Salieri, V.; Bisinella, V.; In *Urban Mining - A global cycle approach to resource recovery from solid waste* 2012, CISA: Roma, 2012, cap 12.
20. Baldé, C.; Forti, V.; Gray, V.; Kuehr, R.; Stegmann, P.; The global e-waste monitor 2017. Bonn, Geneva, Vienna: United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU), International Solid Waste Association - SCYCLE; 2017. [Link]
21. Seigné-toiz, E.; Gasol, C.; Rieradevall, J.; Gabarrell, X.; Environmental consequences of recycling aluminium scrap in a global market. *Resources, Conservation and Recycling* **2014**, *89*, 94. [Crossref]
22. IPEN - International Pollutants Elimination Network. Toxic toy or toxic waste: Recycling POPs into New Products. Disponível em: <<https://ipen.org/documents/toxic-toy-or-toxic-waste-recycling-pops-new-products>>. Acesso em: 19 junho 2021.
23. Chi, X.; Streicher-Porte, M.; Wang, M.; Reuter, M.; Informal electronic waste recycling: a sector review with special focus on China. *Waste Management* **2011**, *31*, 731. [Crossref] [PubMed]
24. Hall, W.; Williams, P.; Separation and recovery of materials from scrap printed circuit boards. *Resources, Conservation and Recycling* **2007**, *51*, 691. [Crossref]
25. Yang, T.; Liu, Q.; Chen, L.; Recovery of tin from metal powders of waste printed circuit boards. *Waste Management* **2017**, *68*, 449. [Crossref] [PubMed]
26. Santos, C.; A Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012. [Link]
27. Yamane, L.; Moraes, V.; Espinosa, D.; Tenório, J.; Recycling of WEEE: Characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers. *Waste Management* **2011**, *31*, 2553. [Crossref] [PubMed]
28. Goosey, M.; Kellner, R.; A Scoping Study End-of-Life Printed Circuit Boards. Environmental Working Group 2003. [Link]
29. Priya, A.; Hait, S.; Qualitative and quantitative metals liberation assessment for characterization of various waste printed circuit boards for recycling. *Environmental Science and Pollution Research* **2017**, *24*, 27445. [Crossref] [PubMed]
30. Khanna, R.; Park, M.; Mukherjee, P.; Mishra, S.; Cayumil, R.; In *Critical and Rare Earth Elements*, Abhilash, A. A. (Ed), 1st ed, CRC Press: New York, 2019, cap 15. [Link]
31. Korf, N.; Løvok, A.; Figi, R.; Schreiner, C.; Kuntz, Z.; Mähltz, P.; Rösslein, M.; Wäger, P.; Rotter, V.; Multi-element chemical analysis of printed circuit boards - challenges and pitfalls. *Waste Management* **2019**, *92*, 124. [Crossref] [PubMed]
32. Buechler, D.; Zyaykina, N.; Spencer, C.; Lawson, E.; Ploss, N.; Hua, I.; Comprehensive elemental analysis of consumer electronic devices: rare earth, precious, and critical elements. *Waste Management* **2020**, *103*, 67. [Crossref]
33. Arshadi, M.; Mousavi, S.; Multi-objective optimization of heavy metals bioleaching from discarded mobile phone PCBs: simultaneous Cu and Ni recovery using *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Separation and Purification Technology* **2015**, *147*, 210. [Crossref]
34. Petranikova, M.; Orac, C.; Miskufova, A.; Havlik, T.; *European Metallurgical Conference*, Austria 2009.
35. Martins, A.; Silva, H.; Peres, A.; Pereira, C.; Torem, M.; Dutra, A.; Reciclagem de placas de circuito impresso de computadores sucata para a recuperação de estanho por eletroeluição de resinas poliméricas de troca iônica. *Holos* **2014**, *4*, 3. [Crossref]
36. Cui, J.; Zhang, L.; Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review. *Journal of Hazardous Materials* **2008**, *158*, 228. [Crossref] [PubMed]
37. Akcil, A.; Erust, C.; Sekhar, C.; Ozgun, M.; Sahin, M.; Tuncuk, A.; Precious metal recovery from waste printed circuit boards using cyanide and non-cyanide lixiviants - A review. *Waste Management* **2015**, *45*, 258. [Crossref] [PubMed]
38. Abrão, A.; *Química e tecnologia das terras-raras*, CETEM/CNPq: Rio de Janeiro, 1994. [Link]
39. Silva Junior, A.; Campos, M.; Relevância das terras raras para o setor energético. *Holos* **2016**, *1*, 350. [Crossref]
40. Santos, C.; Panossia, Z.; Revisão Bibliográfica Sobre Metais Terras Raras. *Revista IPT - Tecnologia e Inovação* **2017**, *1*, 6. [Crossref]
41. Abreu, R.; Morais, C.; Study on separation of heavy rare earth elements by solvent extraction with organophosphorous acids and amine reagents. *Minerals Engineering* **2014**, *61*, 82. [Crossref]
42. USGS - United States Geological Service. Mineral Commodity Summaries. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf>>. Acesso em: 05 junho 2021.
43. Santos, R.; Ribeiro, V.; Breve revisão bibliográfica dos processos de lixiviação de minérios e concentrados de terras-raras. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC 2014, 84, 50. [Link]
44. Kim, E.; Osseo-Asare, K.; Aqueous stability of thorium and rare earth metals in monazite hydrometallurgy: Eh-pH diagrams for the systems Th-, Ce-, La-, Nd-(PO₄)-(SO₄)H₂O at 25°C. *Hydrometallurgy* **2012**, *113*, 67. [Crossref]
45. Gupta, C.; Krichnamurthy, N.; Extractive Metallurgy of Rare Earths. Boca Raton, Florida: CRC Press 2004, 504.
46. Michelis, I.; Ferella, F.; Varelli, E.; Veglio, F.; Treatment of exhaust fluorescent lamps to recover yttrium: Experimental and process analyses. *Waste Management* **2011**, *31*, 2559. [Crossref] [PubMed]
47. Wang, X.; Mei, G.; Zhao, C.; Lei, Y.; *5th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering (ICBBE) 2012*, Wuhan, China, 2011. [Crossref]
48. Yang, F.; Kubota, F.; Baba, Y.; Kamiya, N.; Goto, M.; Selective extraction and recovery of rare earth metals from phosphor powders in waste fluorescent lamps using an ionic liquid system. *Journal of Hazardous Materials* **2013**, *254*, 79. [Crossref] [PubMed]
49. Resende, L.; Morais, C.; Study of the recovery of rare earth elements from computer monitor scraps leaching experiments. *Minerals Engineering* **2010**, *23*, 277. [Crossref]
50. Yin, X.; Tian, X.; Wu, Y.; Zhang, Q.; Wang, W.; Li, B.; Gong, Y.; Zuo, T.; Recycling rare earth elements from waste cathode ray tube phosphors: Experimental study and mechanism analysis. *Journal of Cleaner Production* **2018**, *205*, 58. [Crossref]
51. Miskufova, A.; Kochmanova, A.; Havlik, T.; Horvathova, H.; Kuruc, P.; Leaching of yttrium, europium and accompanying elements from phosphor Coatings. *Hydrometallurgy* **2018**, *176*, 216. [Crossref]

52. Rabatho, J.; Tongamp, W.; Takasaki, Y.; Haga, K.; Shibayama, A.; Recovery of Nd and Dy from rare earth magnetic waste sludge by hydrometallurgical process. *Journal of Material Cycles and Waste Management* **2013**, *15*, 171. [[Crossref](#)]
53. Yoon, H.; Kim, C.; Chung, K.; Lee, S.; Joe, A.; Shin, Y.; Lee, S.; Yoo, S.; Kim, J.; Leaching kinetics of neodymium in sulfuric acid from E-scrap of NdFeB permanent magnet. Korean. *Journal of Chemical Engineering* **2014**, *31*, 706. [[Crossref](#)]
54. Lee, C.; Chen, Y.; Liao, C.; Popuri, S.; Tsai, S.; Hung, C.; Selective leaching process for neodymium recovery from scrap Nd-Fe-B magnet. *Metallurgical and Materials Transactions* **2013**, *44*, 5825. [[Crossref](#)]
55. Meshram, P.; Pandey, B.; Mankhand, T.; Process optimization and kinetics for leaching of rare earth metals from the spent Ni-metal hydride batteries. *Waste Management* **2016**, *51*, 196. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
56. Yang, X.; Zhang, J.; Fang, X.; Rare earth element recycling from waste nickel–metal hydride batteries. *Journal of Hazardous Materials* **2014**, *279*, 384. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
57. Priya, A.; Hait, S.; Biometallurgical recovery of metals from waste printed circuit boards using pure and mixed strains of *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidiphilium acidophilum*. *Process Safety and Environmental Protection* **2020**, *143*, 262. [[Crossref](#)]
58. Justel, T.; Nikol, H.; Ronda, C.; New developments in the field of luminescent materials for lighting and displays. *Angewandte Chemie International Edition* **1998**, *37*, 3084. [[Crossref](#)]
59. Ronda, C.; Phosphors for lamps and displays an applicational view. *Journal of Alloys Compounds* **1995**, *225*, 534. [[Crossref](#)]
60. Chen, M.; Zhang, F.; Zhu, J.; Lead recovery and feasibility of foam glass production from funnel glass of dismantled cathode ray tube through pyrovacuum process. *Journal of Hazardous Materials* **2009**, *161*, 1109. [[Crossref](#)]
61. Ling, T.; Poon, C.; Utilization of recycled glass derived from cathode ray tube glass as fine aggregate in cement mortar. *Journal of Hazardous Materials* **2011**, *192*, 451. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
62. Binnemans, K.; Jones, P.; Van Gerven, T.; Yang, Y.; Walton, A.; Buchert, M.; Recycling of rare earths: a critical review. *Journal of Cleaner Production* **2013**, *51*, 1. [[Crossref](#)]
63. Innocenzi, V.; Michelis, Y.; Ferella, F.; Beolchini, F.; Kopacek, B.; Veglio, F.; Recovery of yttrium from fluorescent powder of cathode ray tube, CRT: Zn removal by sulphide precipitation. *Waste Management* **2013**, *33*, 2364. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]
64. Huang, P.; Li, J.; Zhang, S.; Chen, C.; Han, Y.; Liu, N.; Xiao, Y.; Wang, H.; Zhang, M.; Yu, Q.; Liu, Y.; Wang, W.; Effects of lanthanum, cerium, and neodymium on the nuclei and mitochondria of hepatocytes: accumulation and oxidative damage. *Environmental Toxicology and Pharmacology* **2011**, *31*, 25. [[Crossref](#)] [[PubMed](#)]