

A Importância no Brasil da Mineração Urbana de Terras Raras nos Resíduos Eletroeletrônicos: Cenário atual, Políticas, Extração e Perspectivas.

The Importance in Brazil of Urban Mining of Rare Earths from Electrical and Electronic Waste: Current status, Policies, Extraction and Prospects.

Jéssica Tozzo da Silva¹

Juan Carlos Guerrero Barreto²

Carlos Roberto Mendes de Oliveira³

José Rocha Andrade da Silva⁴

Resumo: Os Elementos de Terras Raras (ETR) estão presentes nos equipamentos eletroeletrônicos, como televisores, computadores e lâmpadas fluorescentes, assim, o reaproveitamento dos resíduos provenientes destes produtos pode se tornar uma fonte secundária para sua extração. A recuperação dos ETR's contidos nos Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) pode ser possível a partir da mineração urbana, por sistemas de reciclagem os quais atuam na redução dos impactos ambientais causados pelo descarte incorreto dos REEE, além de gerar emprego e renda a catadores. O presente trabalho visa demonstrar a importância da Reciclagem de REEE e da Mineração Urbana de Terras Raras no Brasil, a necessidade de maiores investimentos no desenvolvimento de pesquisas nessa área, e de divulgação de dados referente à viabilidade de processos de extração destes elementos. Por fim, os REEE com maiores quantidades de ETR aproveitáveis levantados nesta pesquisa são as lâmpadas fluorescentes (LF) e monitores tubo de raios catódicos (CRT), os quais assinalam para uma viabilidade técnica e econômica de recuperação.

Palavras-chave: Resíduos Eletroeletrônicos. Elementos de Terras Raras. Reciclagem. Mineração Urbana.

Abstract: The Rare Earths Elements (REE) can be found on electrical and electronic equipment such as TVs, computers and fluorescent lamps, thus, the reuse of solid residues from these products can become a secondary source for its extraction. The REE recovery from Waste of Electrical and Electronic Equipment (WEEE) can be possible by urban mining methods, just as recycle systems, which act reducing environmental impacts caused by the incorrect disposal of WEEE, and generating a new source of jobs for garbage collectors. The present work aims to promote the relevance of WEEE's recycle and urban mining of REE, the importance of investing in development research to recovery REE in Brazil and relates the most important process to recovery the REE from WEEE. Finally, the WEEE with highest ETR concentration are the fluorescent lamps (FL) and Cathode Ray Tube (CRT), the quantities of rare earth in these products suggest that commercial recovery of rare earth from them be feasible.

Keywords: Waste of Electrical and Electronic Equipment. Rare Earths Elements. Recycling. Urban Mining.

¹ Graduando, UNICAMP, jessica.silva@cti.gov.br

² Doutor, Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer, juan.barreto@cti.gov.br

³ Doutor, Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer, carlos.oliveira@cti.gov.br

⁴ Mestre, Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer, rocha@cti.gov.br

1 INTRODUÇÃO

As terras raras (TR) são consideradas elementos estratégicos para o desenvolvimento de um país por serem usadas na fabricação de diversos tipos de itens (ZHU et al, 2016), principalmente de alta tecnologia, como supercondutores, repetidores laser e luminóforos (FERREIRA e NASCIMENTO, 2013). Os Elementos de Terras Raras (ETR) estão presentes também em equipamentos eletroeletrônicos de uso cotidiano, como computadores, lâmpadas fluorescentes, entre outros (FERREIRA e NASCIMENTO, 2013; ROCIO et al, 2012).

Atualmente, o Brasil sentindo a necessidade de diminuir a dependência de ETR da China está desenvolvendo políticas públicas tais como o Plano Nacional de Mineração, que incentivam a extração destes elementos a partir de fontes primárias (BRASIL, 2011). Entretanto, a extração de ETR a partir de fontes secundárias, principalmente dos Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE), também deve ser considerada, devido à grande quantidade desse material que é gerada atualmente no País (BONIFAZZI e COSSU, 2013; FERREIRA e NASCIMENTO, 2013; ROCIO et al, 2012).

Os REEE são produzidos devido ao avanço da tecnologia, os Equipamentos Eletroeletrônicos (EEE) se tornam obsoletos mais rapidamente, implicando no crescimento rápido do consumo, aumentando também seu descarte e, conseqüentemente, o volume de resíduos com potencial não aproveitado (LIMA et al, 2016). Vários componentes dos REEE têm uma concentração considerável de terras raras com alto grau de pureza, quando comparado aos minérios explorados pela mineração convencional, o que torna interessante sua recuperação a partir destes resíduos (BONIFAZZI e COSSU, 2013; FERREIRA e NASCIMENTO, 2013; ROCIO et al, 2012).

A recuperação dos ETRs contidos nos REEE torna-se possível a partir da mineração urbana por sistemas de reciclagem e aumento das fontes secundárias, as quais auxiliam a direcionar o Brasil para a independência Chinesa no setor mineral de terras raras (BRASIL, 2010; BONIFAZZI e COSSU, 2013; FERREIRA e NASCIMENTO, 2013).

Os objetivos deste trabalho são mostrar o cenário atual da mineração urbana para recuperação de ETR a partir dos REEE, avaliar se existe a

possibilidade técnica e sustentável desta recuperação, em escala industrial no Brasil e divulgar o trabalho que está sendo realizado atualmente pelo CTI Renato Archer.

2 ETR, APLICAÇÕES E IMPORTÂNCIA

As terras raras são 17 elementos químicos, dos quais 15 são da série lantanídeos (lantânio; cério; praseodímio; neodímio; promécio; samário; európio; gadolínio; térbio; disprósio; hólmio; érbio; túlio; itérbio) mais o ítrio e escândio (ZHU et al, 2016; FILHO e SERRA, 2014; ALMEIDA e MORAES, 2013). Eles são definidos como um grupo por conta das propriedades espectroscópicas e magnéticas semelhantes (ZHU et al, 2016).

Os elementos de terras raras têm vasta aplicação em produtos de uso doméstico e em equipamentos de alta tecnologia, implicando no alto valor econômico agregado ao mineral, os quais tem maior recorrência nos equipamentos eletroeletrônicos (EEE) como celulares; televisores; computadores; disco rígido; emissores de luz (LED); lâmpadas fluorescentes (ZHU et al, 2016; FERREIRA e NASCIMENTO, 2013; ROCIO et al, 2012). No Brasil, estes elementos são empregados principalmente em ímãs permanentes para motores e turbinas de geração de energia eólica; polimentos de vidros e lentes especiais; catalisadores de automóveis; refino de petróleo; pó fosfórico presentes em televisores e monitores de tubo de raios catódicos (CRT) (LIMA e NEVES, 2016; ALMEIDA e MORAES, 2013).

O Quadro 1 mostra as principais aplicações de ETR discriminada por elemento. Os tubos CRT e as lâmpadas contêm no pó fluorescente quantidades significativas de Y, La, Eu, Ce, Tb, Gd e Nd (WU et al, 2014; INNOCENZI (a) et al, 2013). Entretanto, a produção de ímãs acaba sendo uma das principais aplicações de terras raras no Brasil, sendo o principal incentivo para a produção de Nd a partir de fontes primárias (FERREIRA e NASCIMENTO, 2013; ROCIO et al, 2012).

Quadro 1 - Elementos de terras raras e suas principais aplicações.

Elemento	Aplicações
Escândio (Sc)	Ligas de alumínio para componentes aeroespaciais ¹ ; lâmpadas a vapor ¹ .
Ítrio (Y)	Laser de ítrio-alumínio ¹ ; supercondutores ¹ ; radares ² ; filtro de micro-ondas ¹ ; fósforos ² .
Lantânio (La)	Vidros ¹ ; armazenamento de hidrogênio ¹ ; eletrodos de bateria ¹ ; lentes de câmeras ¹ ; catalisadores em refinarias de petróleo ¹ .
Cério (Ce)	Agente oxidante ¹ ; pó para polimento ¹ ; vidros e cerâmicas ¹ ; catalisadores (Automóveis, refino de petróleo e fornos autolimpantes) ¹ .
Preseodímio (Pr)	Ímãs ¹ ; lasers ¹ ; pigmentos ² ; cerâmica ² ; aditivo em lentes de óculos de soldagem ¹ .
Neodímio (Nd)	Ímãs ¹ ; lasers ¹ ; pigmentos ² ; capacitores de cerâmica ¹ ; filtros infravermelhos ² .
Promécio (Pm)	Baterias nucleares ¹ ; fósforos ² .
Samário (Sm)	Ímãs ^{1,2} ; lasers ¹ ; aplicações nucleares ² .
Európio (Eu)	Pigmento em tubos de raios catódicos ¹ ; lasers ¹ ; lâmpadas a vapor ¹ ; ressonância magnética nuclear ¹ .
Gadolínio (Gd)	Ímãs ¹ ; vidros ¹ ; lasers ¹ ; tubos de raios X ¹ ; chips de memória ¹ ; captura de nêutrons ¹ ; ressonância magnética nuclear ¹ .
Térbio (Tb)	Ímãs permanentes ¹ ; pigmento em tubos de raios catódicos ¹ ; lasers ¹ ; lâmpadas fluorescentes ¹ .
Disprósio (Dy)	Ímãs permanentes ¹ ; lasers ¹ .
Hólmio (Ho)	Lasers ¹ .
Érbio (Er)	Lasers ¹ ; liga de aço-vanádio ¹ .
Túlio (Tm)	Máquinas portáteis de raios X ¹ .
Ítérbio (Yb)	Lasers de infravermelho ¹ ; agente químico redutor ¹ .
Lutécio (Lu)	Detectores para tomografia por emissão de pósitrons ¹ ; vidros de alto índice de refração ¹ .

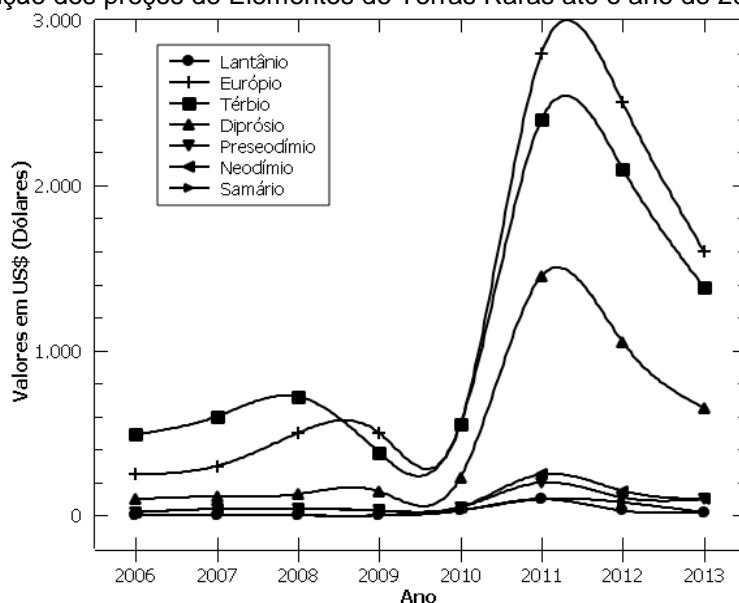
Fontes: ¹ Rocio et al (2012); ² Ferreira e Nascimento (2013).

Segundo o Plano Nacional de Mineração - 2030 da Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral do Ministério de Minas Energia, um dos três fatores que define um elemento estratégico é o alto crescimento do valor agregado, da oferta e procura do mineral nas últimas décadas, pela aplicação destes em produtos de alta tecnologia (BRASIL, 2011), como é o caso das terras raras, que em 2011, por exemplo, movimentou no mercado mineral entre US\$ 2 bilhões e US\$ 3 bilhões, sendo o Brasil o responsável por US\$ 40 milhões (TEIXEIRA et al, 2013). No mercado mundial o neodímio também é o elemento do grupo com maior valor agregado, seguido do Dy, com um aumento da demanda mundial que pode chegar à 700% e 2600%, respectivamente, em 25 anos, devido ao avanço tecnológico e o consumo de EEE (DUPONT e BINNEMANS, 2015).

A Figura 1 mostra a evolução dos preços de ETR ao decorrer dos anos, indicando um aumento extremo entre os anos de 2010 e 2012, podendo ser, uma das contribuições desse crescimento, o aumento do valor agregado e a

importância comercial dos ETR, provocado pelo aumento da procura por esses elementos no mercado de minérios (TEIXEIRA et al, 2013).

Figura 1 - Evolução dos preços de Elementos de Terras Raras até o ano de 2013.



Fonte: Adaptado de Teixeira et al (2013).

A exploração dos elementos estratégicos que estão em ascensão no mercado mundial significa alta participação na produção e exportação e pode tornar o Brasil competitivo no mercado de ETR, alavancando a economia do país (BRASIL, 2011; ALMEIDA e MORAES, 2012; ROCIO et al, 2012).

Por conta disso, no Brasil, estão surgindo novas propostas para fabricação de equipamentos que contém ETR (TEIXEIRA et al, 2013). A Fundação Centro de Referência em Tecnologia em parceria com o Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) apresentou à Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) um projeto relacionado ao aumento da produção de ímãs permanentes no Brasil, com a justificativa de mercado promissor baseado no alto consumo mundial de ímãs permanentes, cerca de 70 mil toneladas por ano, o qual pode aumentar oito vezes em 20 anos. O fato é que o Brasil não pode ficar estacionado, tendo que avançar junto com a economia mundial de Terras Raras, sendo necessário o investimento para a fabricação de até mil toneladas de ímãs por ano (TEIXEIRA et al, 2013).

Outro ponto que é preciso ressaltar é o incentivo à mineração primária de TR no Brasil, representada pelo Programa de Apoio ao Desenvolvimento

Tecnológico dos Minerais de Elementos de terras raras e à criação da cadeia produtiva (PADETR), previsto no projeto de Lei que foi apresentado em 2013 (PL529-2013) (BRASIL, 2013). Este programa está sob a responsabilidade do poder executivo e visa fomentar projetos de pesquisas aplicadas à cadeia produtiva de ETR, apoiando empresas, universidades e centros de pesquisa no Brasil.

Além do PADETR no Brasil, o Plano Nacional de Mineração é uma política do Ministério de Minas e Energia para auxiliar no planejamento do setor mineral em geral e tem como objetivo nortear as políticas de incentivo à sustentabilidade do setor mineral, enfatizando os minerais estratégicos e pesquisas de viabilidade econômica no País (BRASIL, 2011).

3 DEPENDÊNCIA DE TERRAS RARAS

O mercado mundial de terras raras tem como principal fornecedor de matéria prima a China com a maior reserva mundial do mineral Bastnasita ((La, Y, Ce)CO₃F), por exemplo, dominando 95% do comércio dos compostos de terras raras (ZHU et al, 2016; FILHO e SERRA 2014) e com um crescimento interno da demanda de cerca de 70% da sua produção (FILHO e SERRA, 2014). Por conta desse domínio do mercado, a China se tornou um monopólio de exportação e produção desses elementos, fazendo com que vários países passassem a depender de sua produção (ZHU et al, 2016).

Segundo estudo do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC) (TEIXEIRA et al, 2013), um dos motivos que contribuiu na transformação da China em monopólio de terras raras foi o desinteresse na mineração desses elementos por parte de alguns países produtores, pois negligenciaram a importância da produção e não deram credibilidade à estratégia desses elementos (FILHO e SERRA, 2014; ROCIO et al, 2012; TEIXEIRA et al, 2013). O Brasil, por exemplo, há 100 anos era um dos maiores produtores de elementos de terras raras (ETR), a exploração desses elementos iniciou-se em 1886, na areia de Cumuruxatiba, na Bahia (TEIXEIRA et al, 2013). A monazita começou a ser explorada no Brasil e destinada à Austrália e Alemanha principalmente por conter Tb e Ce, elementos que participavam da fabricação de vidros para Lâmpadas a gás (Iluminação da época) por conta de

sua estabilidade em alta temperatura. O Brasil foi o maior fornecedor de Monazita até 1914, perdendo essa posição para a Índia (FILHO e SERRA, 2014). O foco da mineração no Brasil mudou na década de 1950, quando passou a se preocupar mais com a extração de minerais com aplicações nucleares, tais como tório e urânio, e desde então se encontra em desvantagem no mercado de terras raras (TEIXEIRA et al, 2013).

Em 2005, a China anunciou a redução da produção e da exportação de ETR, alegando a necessidade de preservar suas reservas naturais (ZHU et al, 2016; ROCIO et al, 2012; LIMA e NEVES, 2016). Esta ação agravou a dependência dos países importadores de terras raras perante à China e implicou no aumento dos preços dos ETR, devido à procura ser maior que a oferta (ROCIO et al, 2012; LIMA e NEVES, 2016).

Com isso, em 2006, a diminuição da taxa de exportação pela China teve como consequência o aumento dos preços dos elementos de terras raras em 31%, abaixando a competitividade dos produtores de ímãs de fora da China (ROCIO et al, 2012). A preocupação global baseada nessa redução de cotas comerciais ligadas as terras raras está em uma possível diminuição mais severa, que pode implicar na escassez de matéria prima e na instabilidade dos preços, com consequências adversas aos países emergentes que não detém reservas naturais de tecnologias de extração de elementos de terras raras (ROCIO et al, 2012; FERREIRA e NASCIMENTO, 2013).

O mercado interno de Terras Raras no Brasil está voltando a crescer após o choque de preços dos ETR impostos pela China, com a diminuição da quota em 2011. O Brasil consome anualmente aproximadamente 1.200 toneladas de ETR, os quais tem destino quase total para a aplicação em catalisadores de craqueamento de petróleo para gás e gasolina. A quantidade que não vai para o mercado de combustível é aplicada, em sua maioria em ímãs permanentes. Apesar de servir, principalmente, para estas aplicações no Brasil, ainda é necessário aumentar os investimentos (governamentais e/ou privados), em pesquisas científicas e tecnológicas, visando promover o desenvolvimento de métodos de recuperação viáveis na mineração urbana e possivelmente agregar valor à cadeia produtiva dos ETR, juntamente à extração mineral primária no Brasil (TEIXEIRA et al, 2013).

4 POLÍTICAS PÚBLICAS PARA RECUPERAÇÃO DE ETR

A transformação dos resíduos eletroeletrônicos (REEE) em estoques de ETR implica em desenvolvimento de processos de recuperação e políticas de reciclagem, que por questões de saúde ambiental e urbana, devem ser tratados corretamente (BRASIL, 2010). Além disso, é necessária a realização de coleta seletiva, pois esta promove o garimpo manual de aterros e locais de descarte urbano dos resíduos, os quais são primordiais para que através de cooperativas de reciclagem o resíduo chegue até a instituição que iniciará o processo adequado de recuperação (LIMA et al, 2016; BRASIL, 2010; FERREIRA E NASCIMENTO, 2013). Este processo de reciclagem atua na cadeia produtiva dos REEE, visa fechar o ciclo de vida dos equipamentos eletroeletrônicos, levando em conta as fases de concepção, produção, operação, reutilização dos materiais e obsolescência, gerando emprego e renda na cadeia reversa dos produtos eletroeletrônicos (ABDI, 2013).

No Brasil, a reciclagem dos REEE é garantida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (Lei 12.305 / 2010), que determina as ações necessárias para o funcionamento da gestão de resíduos sólidos (LIMA et al, 2016; BRASIL, 2010) A PNRS determina aos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes o investimento na fabricação de produtos que gerem a menor quantidade de resíduo possível; a divulgação de informações relacionadas à reciclagem e redução de resíduos sólidos urbanos; além de participar de ações previstas pelo plano municipal de gestão de resíduos sólidos; implantar procedimentos que utilizam materiais recuperados, disponibilizar postos de coleta de resíduos de produtos eletroeletrônicos no final de sua vida útil e fazer parcerias com cooperativas de recicladores (BRASIL, 2010; LIMA et al, 2016; FERREIRA e NASCIMENTO, 2013; ABRELPE(a) (2015).

Segundo o Art. 33 do capítulo III, os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de produtos eletroeletrônicos e seus componentes são obrigados a estruturar e implementar sistemas de logística reversa, promovendo o retorno dos produtos com vida útil esgotada, de forma independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos (BRASIL, 2010; ABRELPE (a), 2015; LIMA et al 2016).

Outro programa de apoio é o da Rede Paulista de Extensão Tecnológica componente do Sistema Brasileiro de Tecnologia (SIBRATEC) do Ministro de Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC), criado em 2007 que tem como objetivo auxiliar as micro, pequenas e médias empresas para aumentarem sua competitividade no mercado global e oferece a este setor a modalidade de atendimento Produção Mais Limpa (PROLIMP). Tal modalidade visa ações para adoção de tecnologias mais limpas (adequação a diretiva RoHS, adequação a norma NBR 16156 para recicladoras de resíduos eletroeletrônicos, adequação às normas e regulamentos ambientais). A rede de extensão tecnológica do Estado de São Paulo inclui, como executores, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT e Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer – CTI. Este programa conta com apoio do Governo Federal e da Secretaria de Desenvolvimento Econômico, Ciência, Tecnologia e Inovação do Governo do Estado de São Paulo (LIMA et al, 2016).

A NBR16156 (2013), visa à otimização da atividade de logística reversa apoiando a gestão das instituições dedicadas à destinação ambientalmente correta dos REEE e auxiliar nas práticas de organização e gestão de uma empresa nos processos de reciclagem dos REEE, priorizando a redução dos danos ao meio ambiente e a saúde e segurança de trabalhadores envolvidos nessas atividades (LIMA et al, 2016).

Em 2010, por conta de uma informação passada ao Ministro de Ciência e Tecnologia no 4º Encontro Nacional sobre Terras Raras, foi criado o Grupo de Trabalho Interministerial de minerais estratégicos, que envolve o Ministério de Minas e Energia e o; à época Ministério de Ciência e Tecnologia, Inovações e Comunicações, com o objetivo de enfatizar a importância da produção brasileira de ETR (FILHO e SERRA, 2014; BRASIL, 2011). Este grupo criou uma minuta que explicava as alternativas que deveriam ser tomadas (FILHO e SERRA, 2014). Para incentivar a produção de terras raras no país, em 2013, criou-se o Plano de Mineração Nacional - 2030, de apoio a pesquisa mineral primária, mostrando a importância do estudo da cadeia produtiva de ETR como elementos estratégicos (BRASIL, 2011). O PADETR é dirigido pela Comissão de Ciência e Tecnologia, Comunicação e Informática (CCTCI) proposto pelo senado federal, previsto na PL529-2013, dando origem à PL8325/2014, esta última foi aprovada em 2014 por unanimidade na CCTCI e na Comissão de

Minas e Energia (CME), e aguarda o parecer da Comissão de Finanças e Tributação (CFT) e Comissão de Constituição e Justiça e de Cidadania (CCJC) (BRASIL, 2013; BRASIL, 2014)

5 MINERAÇÃO URBANA E SUA IMPORTÂNCIA NA RECUPERAÇÃO DE ETR

A mineração urbana tem como objetivo principal a redução do impacto negativo ambiental dos resíduos urbanos a geração de empregos e renda na cadeia reversa dos produtos (BRASIL, 2010; COSSU e WILLIAMS, 2015). Este tipo de mineração utiliza a extração de matérias primas na forma mais pura possível a partir de fontes secundárias (BRASIL, 2010; COSSU e WILLIAMS, 2015; FERREIRA e NASCIMENTO, 2013).

É importante saber que a mineração urbana utiliza todos os tipos de resíduos sólidos, não se aplicando somente aos REEE, utilizando, por exemplo, resíduos de demolição, de veículos, de combustão, de incineração, industriais, baterias, pilhas, entre muitas opções, as quais são nomeadas fontes secundárias (BONIFAZZI e COSSU, 2013; COSSU e WILLIAMS, 2015; BRASIL, 2010).

Na mineração Urbana, o fechamento do ciclo da cadeia produtiva dos equipamentos eletroeletrônicos é feito pela logística reversa, a qual se define, como um

“Instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada” (BRASIL, 2010)

As aplicações da logística reversa para os produtos eletroeletrônicos ao final da sua vida útil são importantes para amenizar os impactos ambientais, promover a inclusão social, e, portanto, deve ser economicamente viável (ABDI, 2013; FERNANDEZ, 2012). Entende-se assim, a importância da Mineração Urbana, que além de contribuir para medidas socioambientais, promove o crescimento de estudos e pesquisas tecnológicas relacionados à reciclagem e recuperação de materiais estratégicos, fazendo com que aumente

o interesse de patrocinadores e institutos de pesquisa pelo investimento em grupos de pesquisas aprofundadas sobre a recuperação de terras raras a partir dos REEE (FERNANDEZ 2012).

O Quadro 2 explicita as consequências da mineração urbana e aplicação dos pilares da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), os quais geram benefícios em âmbito social, econômico e ambiental (LIMA et al, 2016; ABDI, 2013). Incentivando o fortalecimento das cooperativas de reciclagem como consequência geração de empregos e inclusão social de catadores (LIMA et al, 2016; ABDI, 2013). Além disso, o setor ambiental e social ganha com a diminuição dos casos de descarte incorreto de REEE, os quais podem ser prejudiciais à saúde humana e podem contaminar o ambiente quando depositados em solos inadequados e rios (LIMA et al, 2016; ABDI, 2013). O desenvolvimento de tecnologias de reciclagem pode contribuir para o aumento da produção interna de terras raras no Brasil, com chances de ganho econômico no setor (ABDI, 2013).

Quadro 2 - Benefícios do sistema de logística reversa.

Benefícios		
Sociais	Econômicos	Ambientais
<ul style="list-style-type: none"> • Geração de empregos formais; • Fortalecimento das associações de catadores com geração de oportunidades de prestação de serviços ao sistema; • Promoção de uma maior conscientização da população quanto às questões ambientais relacionadas aos equipamentos eletroeletrônicos; • Minimização de problemas de saúde causados pelo manuseio e descarte incorreto de REEE. 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior retorno ao mercado de matérias-primas advindas da reciclagem de REEE; • Fortalecimento da indústria da reciclagem pelo consequente aumento da demanda; • Desenvolvimento de tecnologias relacionadas à reciclagem de REEE. 	<ul style="list-style-type: none"> • Diminuição de casos de descarte incorreto de REEE; • Melhoria da qualidade dos serviços de reciclagem e consequente menor nível de rejeitos nos aterros; • Redução de gasto energético e recursos naturais por conta de uso de reciclados em relação à produção primária.

Fonte: ABDI (2013)

6. ETR NOS RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS

Os resíduos eletroeletrônicos (REEE) são classificados em 4 categorias por padrões determinados pela Agência Brasileira de Desenvolvimento

Industrial (ABDI), a Linha Branca, Linha Marrom, Linha Azul e Linha Verde (ABDI, 2013; MOREIRA, 2016).

A geração de REEE no Brasil está em taxa de crescimento, como mostra a Tabela 1, que expressa dados da geração mundial deste tipo de resíduos (RUCEVSKA, et al 2015; ABDI, 2013; FERNANDEZ, 2012). Alguns equipamentos contribuem mais para o aumento desse volume, como os equipamentos mais tecnológicos, os quais tem um tempo de obsolescência menor por conta do rápido avanço da tecnologia, entrando em desuso mais rapidamente (LIMA et al, 2016; MOREIRA, 2016; ABRELPE (a), 2015; ABDI, 2013).

A Tabela 1 mostra a estimativa de progressão da geração mundial de REEE, alertando que se devem tomar medidas para mitigar o impacto. Grande parte desses REEE tem potencial estocado de terras raras, podendo ser tratado como fontes secundárias (KOHL, 2014). Alguns resíduos de produtos da linha marrom como monitores e televisores de tubo e plasma, e a linha verde, tais como os computadores, podem apresentar grandes quantidades de elementos de terras raras (MOREIRA, 2016).

Tabela 1 - Dados da quantidade estimada de REEE produzidos no Brasil e no mundo.

Geração de REEE Produzida (milhões de t/ano)							
Ano	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Mundial	35,8 ³	37,8 ³	39,8 ³	41,8 ^{1,3}	43,8 ³	45,7 ³	47,8 ³
UE	6,5 ^{1*}	9,0 ³	-	11,6 ³	12 ¹	-	-
África	-	-	-	1,9 ³	-	-	-
Oceania	-	-	-	0,6 ³	-	-	-
E.U.A	-	-	-	7,1 ³	-	-	-
Japão	-	-	-	2,2 ³	-	-	-
Índia	-	-	-	1,7 ³	-	-	-
China	3,6 ⁵	-	-	6,0 ³	5,4 ¹	-	-
Brasil	0,9 ²	1,0 ²	1,0 ²	1,1 ²	1,2 ²	1,4 ²	1,4 ²

Fontes: ¹Rucevska et al (2015), ²ABDI (2013), ³Baldé et al (2015), ⁵Wang et al (2013).
*Consumo de 2008 até 2011.

A Tabela 2 mostra que, em geral, o ETR encontrado nos REEE foi o ítrio (Y) (ROCCHETTI e BEOLCHINI, 2014; WU et al, 2014; INNOCENZI(a) et al, 2013; BELARDI et al, 2014). As maiores quantidades de ETR presentes nos REEE foram encontradas nas lâmpadas fluorescentes (LF), nos monitores e nos computadores (desktops e notebooks), com aproximadamente 0,3%, 0,3% e 0,1% de ETR por unidade, respectivamente (RESENDE e MORAIS, 2015; WU et al, 2014; INNOCENZI(a) et al, 2013; BELARDI et al, 2014).

A quantização das ETR presentes nos REEE é fundamental para determinar o tipo de método de recuperação à ser aplicado e viabilidade econômica. Além disso, a quantidade de resíduos gerados pode nos dar um parâmetro do quadro elaborado de fontes secundárias de TR no Brasil, como mostra a Figura 2.

Tabela 2 - Principais REEE que contém ETR. Dados da média.

REEE (g)	Componente (g)	Peça (g)	Quantidade (g)	Fonte
Desktop CRT (24283)	HDD (542)	Ímã NdFeB (16,2)	Dy: 0,22 Nd:3,71 Pr:0,44 Tb:0,02	1
		PCB (32,4)	Nd:0,06 Ce:0,16	
Notebook CRT (2368)	HDD (134)	Ímã NdFeB (7,8)	Nd:1,78 Pr:0,21 Dy:0,11 Tb:0,01	
		PCB (17,5)	Nd:0,04 Ce:0,09	
TV-CRT (31000)	CRT (20667)	Pó fluorescente - azul; vermelho; verde (8,3)	Y:1,1	2,3,9
Monitor CRT (15000)	CRT (3300,0)	Pó fluorescente- azul; vermelho; verde (3,3)	Y:0,57 Nd:0,0003 Sm:0,0007 Eu:0,025	4,9
LF (140)	Tubo de vidro	Pó fluorescente - azul; vermelho; verde (6,0-8,0g)	Y:0,30 La:0,03 Eu:0,02 Ce:0,02 Tb: 0,008 Gd: 0,0007 Nd: 0,0005	5,6,7,8

Legenda: TV – Televisores; HDD - Disco Rígido; CRT – Tubo de Raios Catódicos; LF – Lâmpadas Fluorescentes.

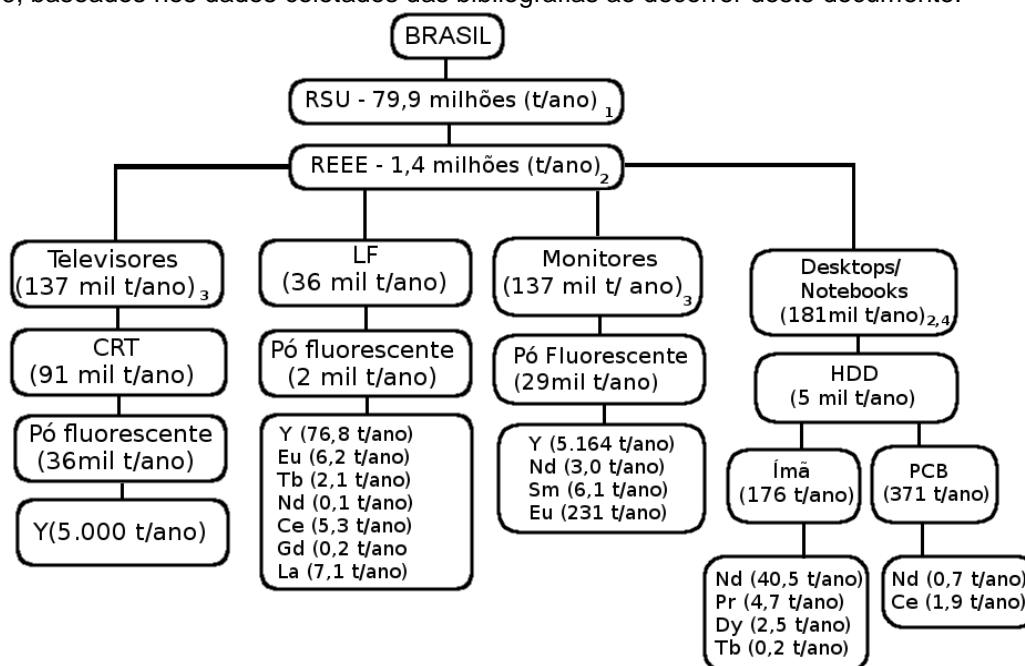
Fonte: ¹Ueberschaar e Rotter (2014), ²Rocchetti e Beolchini (2014), ³Innocenzi et al (a) (2013), ⁴Resende e Morais (2015), ⁵Wu et al (2014), ⁶Innocenzi(b) et al (2013), ⁷Belardi et al (2014), ⁸Bacila et al (2014), ⁹Rodrigues (2015).

A Figura 2 mostra a quantidade de terras raras descartadas por ano no Brasil. Para chegar nesses resultados foram relacionadas as quantidades por classe de REEE descartados por ano no Brasil e as quantidades de TR contidas nessas classes (dados da Tabela 2). As quantidades de computadores descartados por ano foram estimadas segundo ABINEE, 2017, a partir dos dados de venda do ano 2012 e considerando uma estimativa de vida útil de 5 anos. Nesta categoria foram considerados os *desktops* e os *notebooks* como uma só classe.

Como maneira de exemplo para demonstrar o potencial das ETR nos REEE, no Brasil, a quantidade de lâmpadas fluorescentes (LF) produzidas

anualmente, baseados em dados de 2012, é de aproximadamente 260 milhões de unidades, o que corresponde a 36 mil toneladas (Bacila et al, 2014). Considerando que este material não é reaproveitado, temos 97 toneladas de ETR que são desperdiçadas por ano.

Figura 2. Cálculo aproximado da quantidade de ETR nos REEE, descartados no Brasil em 2016, baseados nos dados coletados das bibliografias ao decorrer deste documento.



Fontes: Tabela 2, ¹ABRELPE(b) (2015), ²ABDI (2013), ³Fernandez (2012), ⁴ABINEE (2017).

7 MÉTODOS DE EXTRAÇÃO DE ETR A PARTIR DE REEE

O desenvolvimento de pesquisas para extração de terras raras vem mostrando um crescimento, tanto na mineração convencional, quanto na mineração urbana. Os métodos de extração são importantes, pois cada REEE deve ser tratado/estudado diferentemente de acordo com suas particularidades, toxicidade, periculosidade, etc. O Quadro 3 apresenta os métodos de extração mais utilizados na mineração urbana e sua fase de estudo/aplicação.

De acordo com o Quadro 3, os resíduos eletroeletrônicos com métodos de extração de elementos de terras raras em escala industrial, são as lâmpadas fluorescentes (LF) e os ímãs permanentes (NdFeB). Com a análise do Quadro 3, percebe-se que as pesquisas e os investimentos estão

concentrados nos REEE que contém maior estoque de ETR, como já apresentado e discutido nas Tabelas 1 e 2, os quais permitem processos mais viáveis economicamente. A fase de aplicação industrial é importante para confirmar a viabilidade do processo e estudar os fatores reais de impacto econômico, ambiental e social (TSAMI e COYNE, 2015).

Quadro 3 – Resumo, levantados nesta pesquisa, dos métodos industriais que estão sendo aplicados ou estão em estágio avançado para extração de ETR nos REEE mais importantes.

REEE	Método de Extração	Fase de estudo	Indústria
LF	Ataque químico ao pó fluorescente e posterior recuperação de ETR por precipitação ou extração por solventes	Maduro, porém ainda em desenvolvimento	Rhodia
CRT	Ataque Químico e extração por solventes	Pesquisas limitadas	-
Ímãs permanentes (NdFeB)	Hidrometalúrgicos	Maduro em escala de laboratório	Rhodia
	Pirometalúrgicos	Maduro, porém não em relação à ETR	-
	Extração em fase gasosa	Escala de laboratório	-
	Reprocessamento de ímãs após decrepitação por hidrogênio	Escala de laboratório	-
	Biometalúrgicos	Escala de laboratório	Planta piloto em 2014
Baterias de níquel-hidreto metálico	Hidrometalúrgicos e Pirometalúrgicos	Maduro	Umicore e Rhodia

Fonte: Tsamis e Coyne (2015)

7.1 Lâmpadas Fluorescentes

O processo de Recuperação dos elementos de terras raras a partir de lâmpadas fluorescentes (LF), dentre a literatura revisada, tem uma grande similaridade. É necessário que seja feito o desmantelamento para que seja possível obter o pó fluorescente, componente carregador dos ETR. Normalmente, as técnicas de desmantelamento utilizadas são manuais, devido à sua facilidade e seu baixo custo, porém, existem métodos como o corte por pressão de ar, os quais permitem uma produção de até 500 lâmpadas desmanteladas por hora. A importância maior é da separação das duas tampas de alumínio presentes nas extremidades da Lâmpada, para que o mercúrio presente dentro do tubo de vidro seja retirado, coletado e logo recuperado. Esta técnica requer cuidados específicos, pois o mercúrio é uma substância tóxica (WU et al, 2014).

Após o desmantelamento, é necessário esmagar ou moer as amostras. Esta etapa pode ser realizada em meio líquido (Tratamento feito com acetona ou etanol) ou à seco (desmantelamento manual ou em um equipamento próprio). Estas técnicas tem um cuidado principal com o vazamento do mercúrio, uma vez que este está presente na composição da LF, pois pode trazer riscos à saúde humana e contaminar os elementos desejados (WU et al, 2014).

Posteriormente é realizado o tratamento do pó fluorescente para recuperação dos ETR usando processos metalúrgicos. Nesta etapa, na maioria das vezes, é utilizada a fusão alcalina e a lixiviação ácida com solventes como peróxido de hidrogênio e ácido sulfúrico (IPPOLITO et al, 2017; WU et al, 2014; INNOCENZI et al 2013 (a), INNOCENZI et al, 2013(b); INNOCENZI et al, 2014). A fusão alcalina é realizada em altas temperaturas, visando a decomposição térmica, até atingir a solubilidade das substâncias insolúveis existentes no meio (WU et al, 2014). Este processo é o mesmo utilizado na extração e purificação de ETR de minerais como a monazita (IPPOLITO et al, 2017). Entretanto, os testes de lixiviação são importantes para analisar separadamente as quantidades e os elementos químicos presentes na amostra, adicionando, por exemplo, ácido sulfúrico ao pó é possível dissolver as terras raras permitindo sua quantificação (IPPOLITO et al, 2017; INNOCENZI et al 2013 (a), INNOCENZI et al, 2013(b); INNOCENZI et al, 2014).

Para garantir que um baixo nível de contaminação no produto de ETR e no processo anterior o líquido lixiviado pode passar por um processo de purificação (INNOCENZI et al, 2013(b)). Segundo Innocenzi et al, 2013 (b), em condições adequadas e específicas de pH, concentração, temperatura, tempo, é possível chegar à rendimentos próximos de 100% na lixiviação. Na literatura analisada, normalmente os processos de purificação são divididos em etapas, sendo as mais comuns: a basificação do meio com hidróxido de sódio até pH ideal, e precipitação de impurezas com sulfeto de sódio (INNOCENZI et al, 2013(a); INNOCENZI et al, 2013 (b)).

A precipitação para a recuperação de ETR normalmente tem o objetivo de produzir óxido de terras raras, por ser um processo mais simples de menor custo. O princípio consiste na transferência dos íons de terras raras em solução

para um precipitado insolúvel, que pode ser obtido adicionando ácido oxálico em excesso e em condições ideais de pH, temperatura, concentração e tempo, realizando a calcinação ao final do processo (IPPOLITO et al, 2017; WU et al, 2014; INNOCENZI et al 2013 (a)).

7.1.1.1 Tubos de Raios Catódicos

Os tubos de raios catódicos (CRT) estão presentes em sua maioria nos televisores e nos monitores mais antigos. A análise e os processos de recuperação de ETR a partir destes materiais são semelhantes aos processos das lâmpadas fluorescentes, pois os ETR estão presentes também no pó fluorescentes desses produtos. Segundo a literatura revisada, após o desmantelamento e moagem, no qual o pó é removido do vidro do CRT, normalmente são utilizadas as etapas de lixiviação, purificação, precipitação e calcinação (RESENDE e MORAIS, 2015; INNOCENZI et al 2013 (a); INNOCENZI et al (b)). A lixiviação das ETR pode ser feita com ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio, em quantidades e condições de temperatura, pH, tempo, concentração e agitação adequadas para extração de ETR (TIAN, 2016; INNOCENZI et al, 2013 (a)).

No processo de purificação, assim como nas lâmpadas fluorescentes, normalmente utiliza-se a basificação com hidróxido de sódio corrigindo o pH para condições favoráveis à precipitação de ETR a fim de remover as impurezas presentes e manter um alto índice de rendimento. A obtenção de ETR pode ocorrer pelo processo de precipitação (normalmente por adição de ácido oxálico para obter óxidos de terras raras) junto à calcinação (INNOCENZI et al, 2013 (a)).

7.2 Ímãs de NdFeB

Os Ímãs de NdFeB são encontrados normalmente nos computadores, mais precisamente nos discos rígidos (HDD). Por conta disso, é necessário fazer o desmantelamento do REEE para retirar o ímã e permitir a análise do mesmo (MUNCHEN, 2016; UEBERSCHAAR e ROTTER, 2014). Alguns desmantelamentos são realizados manualmente (UEBERSCHAAR e ROTTER, 2014), porém pode ser feita mecanicamente como, por exemplo, a tecnologia desenvolvida pelo Grupo Hitachi, onde os ímãs são removidos por separação

mecânica (MUNCHEN, 2016). Após a separação dos ímãs é necessária sua desmagnetização. Segundo MUNCHEN (2016), esta etapa pode ser feita por processos térmicos, a qual é realizada em forno elétrico apropriado para altas temperaturas. Uma vez desmagnetizado é necessário cominuir os ímãs para aumentar a área livre da superfície para os posteriores processos hidrometalúrgicos.

Como mostrado no Quadro 3, os processos hidrometalúrgicos são os mais utilizados, além de serem a técnica com maior investimento empresarial na recuperação de ímãs NdFeB. Esta técnica está associada a dissolução da liga metálica em ácidos ou bases minerais. A técnica de extração mais utilizada é a lixiviação, a qual promove a dissolução do ímã em meios tais como HNO_3 , H_2SO_4 , HCl e NaOH . Posteriormente à lixiviação, é utilizada a etapa de purificação onde pode ser aplicada a precipitação seletiva, extração por solvente ou líquidos iônicos (MUNCHEN, 2016).

A precipitação seletiva pode ser aplicada após a lixiviação com ácido sulfúrico (por conta da formação de um precipitado o qual pode ser convertido em trifluoreto de neodímio) ou ácido oxálico (que forma oxalatos de ETR os quais são complexos insolúveis em água). Para obter óxido de terras raras como produto final, é necessário manter o controle de pH a partir da basificação para que o meio se torne ideal à precipitação de ETR (MUNCHEN, 2016).

O método de extração por solventes é um dos mais utilizados na recuperação de ETR em Ímãs de NdFeB, por conta dos equipamentos mais acessíveis, a velocidade de extração e simplicidade de aplicação e a aplicação abrangente e simples na extração por solvente há uma maior variedade de técnicas possíveis como a troca aniônica; troca catiônica; solvatação e quelação. Para a recuperação de ETR utiliza-se normalmente a troca catiônica com ácido fosfórico, ácido neodecanóico, tributilfosfato, ou cloreto de tricapril metil amônio (MUNCHEN, 2016).

As técnicas de extração líquido-líquido surgiram como alternativa mais segura, pois não utilizam baixa pressão de vapor durante o processo e têm uma condutividade elétrica própria. O processo inicia-se com uma reação que carrega ionicamente os compostos a partir de um líquido de ácido orgânico, normalmente di(2-etil-hexil)fosfórico e um líquido de sal orgânico, normalmente

1-hexil-3-metilimidazólio, fazendo com que os compostos fiquem livres para interagir com os ETR. A maior eficácia desse processo se dá em diferentes meios ácidos na recuperação de Nd (III), ou outros ETR trivalentes (MUNCHEN, 2016).

8 CENÁRIO ATUAL DA PESQUISA NO MUNDO E NO BRASIL

Atualmente no Brasil, a pesquisa das terras raras está aumentando. Segundo a plataforma de pesquisa de grupos do CNPq (Diretório Nacional de Grupos de Pesquisa), em 2017, há 81 grupos de pesquisa relacionados às palavras “terras raras”; e 1 grupo relacionado à “recuperação de terras raras”. (FILHO e SERRA, 2014).

Segundo Filho e Serra, 2014, o Brasil é responsável por 1059 publicações com o tema de Terras Raras de 2002 a 2012, sendo que 41% dos trabalhos estão relacionados aos materiais luminescentes e 18% aos materiais magnéticos. As instituições brasileiras com maior contribuição às publicações são, USP (24%), UFPE (14%), IPEN (11%) e UNICAMP (10%). Os países com maior participação nas publicações brasileiras são, a França (9%), Estados Unidos (6%), e Alemanha (5%) (Filho e Serra, 2014).

Atualmente, o Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI) subordinado ao Ministro de Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC) tem projetos voltados à Reciclagem de REEE, dentro do programa AMBIENTRONIC, o qual se preocupa com a redução do impacto ambiental do ciclo de vida dos REEE. Desde 2014 com o projeto REMATRONIC, o CTI Renato Archer vem trabalhando em pesquisas para a recuperação de metais preciosos a partir de placas eletrônicas, visando a melhor relação entre custos, rendimentos e impacto ambiental, buscando a viabilidade econômica dos processos de recuperação no Brasil.

Adicionalmente foi realizada uma busca no portal do periódico CAPES, uma plataforma integrada de artigos científicos, para entender a situação dos avanços das pesquisas sobre TR no cenário mundial. Na busca foram considerados artigos publicados a partir de 2013 até a atualidade, e utilizadas o grupo de palavras-chave em inglês: “*rare earth*”, “*e-waste*”, “*urban mining*” e “*recycling*”. Foram obtidos 16 artigos relacionados ao tema, os quais foram

analisados individualmente, mostrando que os avanços tecnológicos na recuperação de TR, a partir dos REEE, ainda está em defasagem sendo um assunto que precisa ser melhor explorado.

Para encontrar a quantidade de grupos de pesquisas envolvidos com o tema no Brasil, foi utilizada a plataforma integrada do diretório dos grupos de pesquisa no Brasil do Lattes. Foi feita a busca por palavras-chave: “Recuperação de Terras Raras” e “Terras raras”, e foram encontrados, apenas, três grupos de pesquisa que trabalham diretamente na reciclagem ou recuperação de ETR nos REEE no Brasil (Quadro 4).

Quadro 4 – Grupos com projetos e linhas de pesquisa relacionadas à reciclagem e recuperação de ETR a partir dos REEE no Brasil.

Grupos				
	1	2	3	
Linha de pesquisa	TR: Materiais Luminescentes contendo TR – Síntese, caracterização, propriedades e aplicações	Síntese e caracterização de compostos de TR	Materiais Luminescentes e Absorvedores UV contendo TR: Síntese, caracterização, propriedades e aplicações	Recuperação de TR de Rejeitos Domésticos e Industriais
REEE	Materiais Luminescentes	Materiais Luminescentes	Materiais Luminescentes e Absorvedores UV contendo ETR	LF e catalisadores FCC
Datas Situação – Ult. envio	04/2015 - 01/2017	03/2014 - 11/2016	05/2010 -10/2016	05/2010 - 10/2016
Grupo	GPBioCat	GCCQS	Lab. de Terras Raras – Universidade de São Paulo (USP)	
Líder do Grupo	L. Bomfim e J. dos Santos	E. Teotonio e W. Faustino	O. A. Serra	
Local	Bahia - UFBA	Paraíba - UFPB	São Paulo – USP	

9 PERSPECTIVAS

Publicações de 2012 à 2014, apontam que os projetos de reciclagem e recuperação de ETR em desenvolvimento podem contribuir para uma melhora econômica relacionada aos elementos de terras raras, com um aumento da produção em países diferentes da China e uma possível independência do Brasil ao monopólio chinês.

A garantia de um bom mercado para a exportação de ETR está nos países consumidores, que por conta da diminuição da demanda pela China, estão com dificuldades de comprar tais elementos, pela escassez e pelo alto preço de mercado (ROCIO et al, 2012).

No Brasil, o produto mais interessante economicamente a ser fabricado é o Ímã de NdFeB, com maiores índices de produção comparado aos demais equipamentos que contém ETR (ROCIO et al, 2012).

Assim, ainda que o custo da produção desses elementos seja relativamente alto e haja um investimento governamental elevado neste setor, o crescimento da demanda mundial pelas terras raras é uma garantia de ganho econômico (ROCIO et al, 2012; FILHO e SERRA, 2014).

Entretanto, poucos grupos e instituições de pesquisas se dedicam ao desenvolvimento de métodos de recuperação de ETR a partir dos EEE, e poucos são os investimentos governamentais e privados neste setor (ROCIO et al, 2012). Por conta disso é necessário o aumento de investimento para incentivar a pesquisa, e conseqüentemente iniciar a produção de ETR a partir métodos alternativos que utilizam fontes secundárias, agregando valor com geração de emprego e renda na cadeia reversa dos equipamentos eletroeletrônicos (FILHO e SERRA, 2014; ROCIO et al, 2012).

10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Entende-se, pela importância econômica e estratégica dos ETR e pelas altas concentrações e alta pureza desse material existente nos REEE que o Brasil deve investir em mais pesquisas de recuperação a partir desses resíduos uma vez que a quantidade dos EEE descartados a cada dia está em crescimento, como mostrado nesta pesquisa. Além disso, é importante levar em consideração a necessidade de viabilizar economicamente a PNRS, a qual torna obrigatória a aplicação da logística reversa para os EEE, aumentando a atividade de sistemas de reciclagem e criando oportunidades de geração de renda e inclusão social, pela mineração urbana. O Plano Nacional de Mineração, por exemplo, deixa clara a importância econômica da participação do país no mercado de minerais, e o PADETR trata da importância da recuperação de terras raras para a independência econômica do Brasil. Os dados bibliográficos levantados nesse estudo confirmam que os processos de extração de elementos de terras raras a partir de resíduos eletroeletrônicos podem ser viáveis por conta das grandes quantidades geradas, concentrações e pureza presentes em alguns REEE como as lâmpadas fluorescentes, monitores e televisores CRT, e os ímãs de NdFeB dos discos rígidos dos

computadores. Finalmente, pode ser considerado, pela baixa quantidade de projetos de pesquisa em mineração urbana no Brasil, que este trabalho apresenta uma proposta de inovação, demonstrando a importância de investimentos nesse setor, para colocar o Brasil no cenário internacional de recuperação dos materiais estratégicos, a partir de fonte secundárias, fomentando os grupos de pesquisa em universidades e centros de pesquisas nacionais, como exemplo, o Centro de Tecnologia e Informação CTI Renato Archer, que já está trabalhando nessa linha de pesquisa.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL - ABDI. **Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos - Análise de Viabilidade Técnica e Econômica**, Brasília, DF: 2013. Acessado em: 06 dez. 2016. Disponível em: <http://www.abdi.com.br/Estudo/Logistica%20reversa%20de%20residuos_.pdf>

Almeida, M. F. e Moraes, C. A. Usos e aplicações de Terras Raras no Brasil: 2012 – 2030. **Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE)**. Brasília, DF, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA (ABINEE). **Base de dados** : Mercado para PC's e Tablets, 2017. Acesso em: 08 mai. 2016. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/abinee/decon/dados/>>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS – ABRELPE (a). **Anuário: Estimativas dos Custos para Viabilizar a Universalização da Destinação Adequada de Resíduos Sólidos no Brasil**, São Paulo: 2015. Acessado em: 07 fev. 2017. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/estudo_apresentacao.cfm>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS – ABRELPE (b). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**, Brasil: 2015. Acessado em: 05 dez. 2016. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2015.pdf>>

Bacila, D. M.; Fischer, K.; Kolichski, M. B. Estudo sobre reciclagem de Lâmpadas Fluorescentes. **Eng Sanit Ambient**, 2014, Edição Especial, p. 21-30.

Baldé, C. P.; Wang, F.; Kuehr, R.; Huisman, J. The Global e-waste monitor – 2014. **United Nations University (UNU – IAS – SCYCLE)**, 2015

Belardi, G.; Ippolito, N.; Piga, L.; Serracino, M. Investigation on the status of rare Earth elements contained in the powder of spent fluorescents lamps. **Thermochimica Acta**, 2014, v. 591, p. 22-30.

Bonifazzi, G. e Cossu, R. The Urban Mining Concept. **Waste Management**, 2013, v. 33, p. 497–498.

Brasil. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS); altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Câmara dos Deputados, Edições Câmara, Brasília**, v. 2, n. 81 Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 17 set. 2016.

Brasil. Plano Nacional de Mineração 2030 – Geologia, Mineração e Transformação Mineral Catalogação (PNM – 2030), de 2010. **Ministério de Minas e Energia (MME) - Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral (SGM)**, Brasília, DF, fevereiro de 2011. 178 p.

Brasil. Projeto de Lei do Senado Federal nº529, de 10 de dezembro de 2013. Institui o Programa de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico dos Minerais de Elementos Terras-Raras e à Criação de Cadeia Produtiva – PADETR. **Diário Senado Federal (DSF)**, Poder Legislativo, Brasília, DF, 13 de dezembro 2013, nº. 208, p. 94029-94033.

Brasil. Projeto de Lei do Senado Federal nº8325, de 19 de dezembro de 2014. Institui o Programa de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico dos Minerais de Elementos Terras-Raras e à Criação de Cadeia Produtiva – PADETR. **Base de dados: Câmara dos Deputados**. Acesso em: 15 maio 2017. Disponível em:< <http://www.camara.gov.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=860919>>

Cossu, R. e Williams, I. D. Urban mining: Concepts, terminology, challenges. **Waste Management**, 2015, v. 45, p. 1-3.

Dupont, D. e Binnemans, K. recycling of rare earths from NdFeB magnets using a combined leaching/extraction system based on the acidity and thermomorphism of the ionic liquid [Hbet][Tf₂N]. **Green Chemistry**, 2015, v. 17, p. 2150 – 2163.

Fernandez, J. A. **Relatório de Pesquisa: Diagnóstico dos Resíduos Sólidos de Logística Reversa Obrigatória**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), Brasília: 2012. Acessado em: 12 dez. 2016. Disponível em:< http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120807_relatorio_residuos_solidos_reversa.pdf>

Ferreira, F. A. e Nascimento, M. “Terras Raras: Aplicações atuais e reciclagem”. **Série Tecnologia Mineral - CTEM/MCTI**, v. 91, 2013. Acessado em: 05 set. 2016. Disponível em:<<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/handle/cetem/1827/stm-91.pdf?sequence=1>>

Filho, P. C. e Serra, O. A. Terras Raras no Brasil: Histórico, Produção e Perspectivas. **Química Nova**, 2014, v. 37, n. 4, p. 753-760.

Innocenzi, V,(a) De Michelis, I, Kopacek, B., Vegliò, F. Recovery of yttrium from fluorescent powder of cathode ray tube, CRT: Zn removal by Sulphide precipitation. **Waste Management**, 2013, v. 33, p. 2364-2371.

Innocenzi, V, (b) Michaelis, I, Farella, F., Vegliò, F. Recovery of Yttrium from cathode ray tubes and lamps' fluorescent powders: Experimental results and economic simulation. **Waste Management**, 2013, v. 33, p. 2390-2396.

Innocenzi, V., Michaelis, I., Kopacek, B., Vegliò, F. Yttrium recovery from primary and secondary sources: A review of main hydrometallurgical process. **Waste Management**, 2014. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.02.010.

Ippolito N. M., Innocenzi, V., Michelis, I., Medici, F. Rare Earth elements recovery from fluorescent lamps: A new thermal pretreatment to improve the efficiency of the Hydrometallurgical process. **Journal of Cleaner Production**, 2017, v. 153, p. 287-298.

Kohl, C. A. **Caracterização e Valorização de Resíduos de Gabinetes de Microcomputadores de Mesa**. São Leopoldo - TO: Universidade do Vale do Rio dos Sinos Ciências Exatas e Tecnológicas, 2014. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Disponível em: <<http://www.repositorio.jesuita.org.br/bitstream/handle/UNISINOS/3650/Claudia%20Adriana%20Kohl.pdf?sequence=1>> Acesso em: 03 jan. 2017

Lima, A., Rocha, T., Pimentel, M., Feichas, L. The Brazilian Government Efforts to Support Electronic Recycling Facilities to Comply with Environmental Sound Practices. **Electronics Goes Green (EGG)**, 2016, p.7-9.

Lima, T. M. e Neves, C. A. **Sumário Mineral de 2015**. In: ANDRADE, Romualdo Homobono Paes. org. *Terras Raras*. Brasília, DF: Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) - Ministério de Minas e Energia, 2016, v. 35, p.108-110.

Moreira, C. L. **Tratamento Jurídico da Logística Reversa Ambiental de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos**. Marília: Centro Universitário Eurípedes de Marília (UNIVEM), 2016. Tese de mestrado em direito. Acesso em: 16 ago. 2016. Disponível em: <<http://aberto.univem.edu.br/bitstream/handle/11077/1288/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20-%20CAMILLA%20LEONE%20MOREIRA.pdf?sequence=1>>

Munchen, D. D. **Recuperação de Neodímio a partir de ímãs de Neodímio-Ferro-Boro por meio de processos Mecânicos e Hidrometalúrgicos**. Porto Alegre - RG: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016. Dissertação de Mestrado à Engenharia.

Resende, L. V. e Morais, C. A.; Process development for the recovery of europium and yttrium from computer monitor screens. **Minerals Engineering**, 2015, v. 70, p.217 – 221.

Rocchetti, L e Beolchini, F. Environmental burdens in the management of end-of-life cathode ray tubes. **Journal of Cleaner Production**, 2014, v. 34, p. 468-474.

Rocio, M. A., Silva, M. M., Carvalho, P. S; Cardoso, J. G. "Terras-raras: situação atual e perspectivas". **BNDES Setorial**, v. 35, p. 369-420, Março 2012.

Rodrigues, A. C., Gunther, W. M. R., Boscov, M. E. G. Estimativa da geração de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos de origem domiciliar:

proposição de método e aplicação ao município de São Paulo, São Paulo, Brasil. **Eng Sanit Ambient**, 2015, v. 20, n. 3, p. 437-447.

Rucevska, I.; Nellemann, C.; Isarin, N.; Yang, W.; Liu, N.; YU, K.; Sandnaes, S.; Olley, K.; McCann, H.; Devia, L.; Bisschop, I.; Soesilo, D; Schoolmeester, T.; Henriksen, R.; Nilsen, R. Waste Crime – Waste Risks: Gaps in Meeting the Global Waste Challenge. Rapid Response Assessment, United Nations Environment Programme (UNEP) e GRIDArendal, 2015. ISBN 978-82-7701-148-6.

Teixeira, J. C.; Paganine, J.; Guedes, S.; Brasil, T. (Eds). Terras-Raras Estratégia para o futuro. **Em Discussão - Revista de audiências públicas do Senado Federal**, 2013, v. 4, n. 17, Setembro.

Tian, X, Yin X., Wu, Y., Tan, Z., Xu, P. Characterization, recovery potentiality, and evaluation on recycling major metals from waste cathode-ray tube phosphor powder by using sulphuric acid leaching. **Journal of Cleaner Production**, 2016, v. 135, p. 1210-1217.

Tsamis, A., e Coyne, M. Recovery of Rare Earths from Electronic wastes: An opportunity for High-Tech SMEs. **Policy Department A: Economic and Scientific Policy European Parliament**, 2015.

Ueberschaar, M, Rotter, V. S. Enabling the recycling of rare earth elements through product design and trend analyses of hard disk drives. 1ST 3R International Scientific Conference (3RINCs), 2014, Japan. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, 2014, v. 17, n. 2, p. 266-281.

Wang, F.; Kuehr, R.; Ahlquist, D.; Li, J. E-waste in China: A country Report. **StEP Green Paper Series** - United Nations University (UNU-ISP), 2013.

Wu, Y; Yin, X; Zhang, Q; Wang, W; Mu, X. The Recycling of Rare Earths from Waste Tricolor Phosphors in Fluorescent Lamps: A review of processes and technologies. **Resources, Conservation and Recycling**, 2014, vol. 88, p. 21-31.

Zhu, K.; Zhao, S.; Yang, S.; Liang, C.; Gu, D. Where is the way for rare earth industry of China: An analysis via ANP-SWOT approach. **Resources Policy**, 2016, v. 49, p. 349-357.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa de iniciação científica outorgada, número de processo 115889/2016-7. Ao Centro de Tecnologia de Informação Renato Archer CTI pelo uso da sua infraestrutura.

Enviado em: 26 mai. 2017

Aceito em: 18 ago. 2017

Editor responsável: Mateus das Neves Gomes