

# **ABORDAGEM SOBRE RECICLAGEM DE ELEMENTOS TERRAS RARAS EM SUCATA ELETRÔNICA**

**Maria Marizete Cardoso**  
**marmarizete@yahoo.com.br**  
UVA

**Guilherme Augusto de Souza Paz**  
**guele.gui@gmail.com**  
UVA

**Nuno Guilherme Carvalho de Brito**  
**nuguicbn@hotmail.com**  
UVA

**Vinícius Maciel Pinto**  
**profviniciusmaciel@gmail.com**  
UFRJ, UVA

**Edisio Alves de Aguiar Júnior**  
**edisio\_junior@yahoo.com.br**  
INMETRO, UVA

**Resumo:**Produtos eletrônicos possuem metais terras raras e após consumo são descartados na natureza, havendo desperdício dessa matéria-prima. O território brasileiro abriga potencial de reservas naturais comprovado por estudos geológicos, porém riscos ambientais são inerentes à produção. Com o impacto da redução de exportação de óxidos e metais terras raras pela China, países estão necessitando de novas fontes desses minerais estratégicos, já que são utilizados com vasta aplicação em tecnologia de ponta inclusive celulares e computadores. São elementos químicos que possuem propriedades magnéticas, catalíticas, eletrônicas e ópticas. Vislumbra-se que o setor industrial no país aumentará sua necessidade de consumo por essa matéria-prima. Empresas internacionais estão incorporando na logística reversa de seus produtos eletroeletrônicos a reciclagem de elementos terras raras, isso representa uma preocupação com o limite do recurso, alguns desses estão escassos na crosta terrestre e possuem demandas altas sendo considerados minerais críticos. Já existem métodos desenvolvidos para a reciclagem de terras raras em fontes secundárias como produtos após consumo, permitindo sua revalorização, essas sucatas podem ser consideradas minas urbanas. A possibilidade de reaproveitamento desses elementos foi considerada nesse estudo. Existiram situações favoráveis e não-favoráveis à reciclagem considerando os indicadores técnicos, econômicos e ambientais que adotados, além disso, um conjunto de variáveis precisa ser compreendido para se planejar ações voltadas para logística reversa de sucatas eletrônicas, especialmente oriundas de computadores e celulares.

**Palavras Chave: Terras Raras - Sucata Eletrônica - Reciclagem - -**

## **1. INTRODUÇÃO**

Os elementos terras raras (ETR) possuem diferenciadas propriedades eletrônicas, ópticas, magnéticas e catalíticas (BRASIL, 2013). Os ETR's têm grande aplicação em produtos de base tecnológica, especificamente, produtos eletrônicos da linha verde. Esta é composta principalmente por computadores e celulares. (LAPIDO-LOUREIRO, 2013).

A geração de lixo eletrônico está aumentando, especialmente no Brasil, causando desperdício de matérias-primas (PNUMA, 2015). A percepção geral é de que há a necessidade de medidas de reintegração desses metais, possivelmente por reciclagem, ao ciclo produtivo. A logística reversa de eletrônicos tem sido implementada em países desenvolvidos (LEAL, 2013).

O cenário da exploração e comercialização de ETR tem passado por mudanças, após a China, maior exportador desses metais, elevar seu preço de venda e atingir a economia de outros países (SERRA, 2011). Com isso o governo brasileiro vê oportunidade de negócios no comércio internacional e defende a exploração de suas reservas naturais, já que estudos apontam que existe grande potencial destes ETR no território (ANDRADE, 2014; BRASIL, 2013; LAPIDO-LOUREIRO, 2013).

A atividade de exploração mineral é causadora de significativo impacto ambiental (SANCHES e MECI, 2010) e algumas das reservas minerais estão em áreas protegidas, como unidades de conservação e áreas indígenas na Amazônia (DOUROJEANNI, 2013). Soma-se a isso, a contaminação radioativa já que a monazita, o mineral que contém terras raras de maior ocorrência no Brasil, também carrega elemento radioativo (SANTOS, 2005).

Portanto esse trabalho tem como objetivo geral analisar as possibilidades de reaproveitamento dos ETR a partir de produtos eletrônicos pós-consumo no Brasil. Ao longo do trabalho, outros objetivos específicos deverão ser atingidos, como a definição dos ETR's, suas reservas naturais no Brasil, a comercialização entre os países, apontar as aplicações dos ETR's, principalmente as que estão presentes em produtos eletrônicos, o destino desses elementos após uso e a identificação das metodologias para reciclagem de ETR em produtos pós-consumo.

As possibilidades serão exploradas analisando os ETR separadamente, a partir de indicadores técnicos, econômicos e ambientais. A estrutura do trabalho está distribuída em revisão bibliográfica, metodologia, resultados e considerações finais. A revisão bibliográfica, ficou dividida em 5 tópicos, direciona sua atenção para definições ocorrência e preço de mercado dos ETR, uma parte voltada para a química já que trata de métodos de purificação e reciclagem, uma parte voltada para a gestão quando fala da questão da logística reversa de lixo eletrônico e meio empresarial consumidor desses tipos de metais.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. OCORRÊNCIA DE TERRAS RARAS NO BRASIL E OS PREÇOS DE MERCADO**

Os ETR's possuem números atômicos compreendidos entre 51 a 71, e são respectivamente: 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), Itérbio (Yb) e Lutécio (Lu). Os sete primeiros são ETR leves, os

demais são ETR pesados (FIGUEIREDO, 2016). Os elementos Ítrio (Y) de número atômico 21 e Escândio (Sc) de número atômico 39 são considerados ETR (LAPIDO-LOUREIRO, 2013). Y é um ETR pesado (VIEIRA e LINS, 1997).

Os raios iônicos desses elementos têm tamanhos próximos resultando numa aglomeração entre diferentes ETR's, tornando difícil a separação (LEE, 1980 e LAPIDO-LOUREIRO, 2013). Porém, são requeridos na forma separada para as aplicações de alta tecnologia com elevado grau de pureza (LAPIDO-LOUREIRO, 2013). Para isso, por meio de pesquisas científicas, foram desenvolvidos métodos de separação desses metais para alcançar graus de pureza elevados.

Os ETR's são considerados um bem mineral estratégico e crítico "Alguns dos elementos pesados são considerados críticos, já que são menos abundantes e têm mais aplicações tecnológicas, o que pode levar a escassez no mercado" (BRASIL, p. 10, 2013). Os ETR's críticos são: Y, Pr, Nd, Eu, Tb e Dy. LAPIDO-LOUREIRO, 2013 destaca que estão escassos os metais: Y, Dy, Tb, Nd e Eu, necessitando, portanto, a médio e longo prazo de aumento da produção para atender ao setor industrial.

Segundo LAPIDO-LOUREIRO, 2013, os depósitos estão distribuídos em todo o território brasileiro, com grande concentração principalmente nos minerais monazita – uma fonte de ETR leves e tório – encontrada em depósitos resultantes de intemperismo denominados "placers", em carbonatitos (rochas ígneas) – com altos teores de terras raras e em xenotima, sendo que nessa última há concentração de ETR pesados.

As principais ocorrências no Brasil estão em Catalão (Goiás), Araxá (Minas Gerais), Poços de Caldas (Minas Gerais), Pitinga (Amazonas), Rio de Janeiro, Espírito Santo, Bahia e Maranhão, os maiores depósitos são os de Catalão e Araxá (LAPIDO-LOUREIRO, 2013). VIEIRA E LINS, 1997 apontam o termo "recursos identificados" para explicar que a exploração dessas reservas na sua maioria ainda não é economicamente e tecnicamente viável e somente 4 % delas estão sendo exploradas.

Conforme MECHE e SANCHES, 2010, a extração mineral é uma atividade potencialmente causadora de impactos ambientais que utiliza energia, consome muita água, gera emissões atmosféricas e efluentes para rios e cursos d'água de difícil tratamento e descontaminação, além disso, modifica a paisagem devido remoção da vegetação, com isso compromete a biodiversidade da área explorada. Os autores citam que ocorrem ainda, "a redução ou destruição de habitat, afugentamento da fauna, morte de espécimes da fauna e da flora terrestres e aquáticas, (...) interrupção de corredores de fluxos gênicos e de movimentação da biota".

Outro dano a ser considerado é que o beneficiamento da monazita gera exposição à radiação devido formação de resíduos sólidos contendo radioatividade, modificando a radioatividade natural no ambiente (SANTOS, 2005).

A China, inicialmente com baixos custos e sem preocupação ambiental, dominou o mercado de terras raras em vinte anos e hoje comercializa mais de 97% de metais e óxidos, porém com a elevação da demanda interna comprometendo mais de 70% de sua produção, para produtos finais (geradores eólicos, luminóforos, baterias, entre outros) e com as restrições ambientais o país elevou, nos últimos anos, o preço médio das terras raras em mais de dez vezes, limitou cotas de exportação de metais e óxidos (SERRA, 2011).

A HEFA rare earth Canadá Co. Ltd com sua sede na cidade de Baotou na Mongólia, na China, que possui 80% de reservas naturais de terras raras, e possui empresas nos EUA e Canadá, divulga em sua página na internet uma lista de preços de venda desses metais. Foi feita uma comparação dos valores de 2008, divulgados no estudo de LAPIDO-LOUREIRO,

2013, com esses divulgados no ano de 2015 pela HEFA para alguns desses metais, alguns preços se elevaram e outros tiveram queda (Tabela 1).

Tabela 1: Preços comercializáveis de ETR no mercado internacional. Fonte:(LAPIDO-LOUREIRO,2013; HEFA, 2015; MINERALPRICES.COM)

Preços de venda dos ETR		
ETR leves	Valor (US\$/kg) - out 2008	Valor (US\$/kg) – dez 2015
Lantânio - metal	13,00	7,00
Lantânio- óxido	8,00	2,00
Cério metal	10,50	7,00
Cério óxido	3,80	2,00
Praseodímio metal	29,00	85,00
Praseodímio óxido	20,00	52,00
Neodímio metal	29,00	60,00
Neodímio óxido	20,00	42,00
Samário metal	26,00	7,00
ETR pesadas	valor (US\$/kg) - out 2008	valor (US\$/kg) – dez 2015
Európio óxido	525,00	150,00
Gadolínio metal	28,00	55,00
Gadolínio óxido	NÃO ANUNCIADO	32,00
Térbio metal	793,00	550,00
Térbio óxido	621,00	400,00
Disprósio metal	153,00	350,00
Disprósio óxido	118,00	230,00
Érbio metal	NÃO ANUNCIADO	95,00
Érbio óxido	35,00	34,00
Ítrio metal	42,00	35,00
Ítrio óxido	12,00	6,00
Escândio metal	NÃO ANUNCIADO	15.000,00
Escândio óxido	NÃO ANUNCIADO	4.200,00
Mischmetal	NÃO ANUNCIADO	6,00

Devido à estratégia tecnológica observa-se que ETR leves têm preços menores em comparação aos dos ETR pesados.

Um estudo de fevereiro de 2012 publicado pela Câmara dos Deputados, mostrou que entre 2002 e 2003 os preços da maioria dos ETR's caíram, e depois subiram gradualmente até 2006. Houve um primeiro pico em 2008 e um grande pico de preços em 2011. A diferença de preços foi maior entre 2010 e 2011 (MARTINS, *et al*, 2014).

## 2.2. MÉTODOS DE PURIFICAÇÃO DOS ETR'S E SUAS APLICAÇÕES

Para a separação de um metal lantanídico de outro, tem-se os métodos possíveis para isso, como: precipitação, reação térmica, cristalização fracionada de sais simples (nitratos, sulfatos, bromatos, percloratos e oxalatos), formação de complexos, extração por solventes,

variação de valência e cromatografia de troca iônica. Entretanto, somente os dois últimos continuam a ser empregados (LEE, 1999).

A elevação do grau de pureza dos ETR's facilitou a vasta aplicação (Tabela 2) desses metais e seu aproveitamento em produtos industrializados favorecendo a cadeia produtiva, o que contribuiu para agregar valor.

Tabela 2: Aplicações dos 17 ETR. Fonte: (adaptado de LAPIDO-LOUREIRO, 2013 *apud* BRITISH GEOLOGICAL SURVEY, 2010 e Rocio, et al, 2012).

Elemento	Aplicações
Cério (Ce)	Catálise (automóveis e refino de petróleo), cerâmicas, vidros, <i>mischmetal</i> *, fósforos, pós para polimento, catalisadores em fornos autolimpantes.
Disprósio (Dy)	Cerâmicas, fósforos, aplicações nucleares, ímãs permanentes e lasers.
Érbio (Er)	Cerâmicas, coloração de vidros, fibras óticas, lasers, aplicações nucleares e ligas de aço-vanádio.
Európio (Eu)	Fósforos, Pigmento em tubos de raios catódicos; <i>lasers</i> ; adicionado ao mercúrio em lâmpadas a vapor; agente de relaxação em ressonância magnética nuclear
Gadolínio (Gd)	Cerâmicas, vidros, detecção ótica e magnética, tubos de raios X, Ímãs; vidros de alto índice de refração; <i>lasers</i> ; <i>chips</i> de memória; captura de nêutrons; agente de contraste em imagens de ressonância magnética; agente de relaxação em ressonância magnética nuclear.
Hólmio (Ho)	Cerâmicas, lasers e aplicações nucleares.
Lantânio (La)	Catálise automotiva, vidros de alto índice de refração; armazenamento de hidrogênio; eletrodos de bateria; lentes de câmeras; catalisadores de fluidos em refinarias de petróleo.
Lutécio (Lu)	Cintiladores de cristal único. Detectores para tomografia por emissão de pósitrons; vidros de alto índice de refração.
Neodímio (Nd)	Catálise, filtros infravermelho, lasers, ímãs permanentes, pigmentos, colorante violeta em vidros e cerâmicas; capacitores de cerâmica.
Praseodímio (Pr)	Cerâmicas, vidros, pigmentos, Ímãs; <i>lasers</i> ; iluminação de arco de carbono; colorantes em vidros e esmaltes; aditivo em lentes de óculos de soldagem.
Promécio (Pm)	Fósforos, miniaturas de baterias nucleares e dispositivos de medida.
Samário (Sm)	Filtros de micro-ondas, aplicações nucleares e ímãs permanentes.
Térbio (Tb)	Fósforos – lâmpadas fluorescentes, ímãs permanentes; pigmento verde em tubos de raios catódicos; <i>lasers</i> .
Túlio (Tm)	Tubos de feixes eletrônicos e visualização de imagens médicas (máquinas portáteis de raios X).
Ítérbio (Yb)	Indústrias química e metalúrgica: <i>Lasers</i> de infravermelho; agente químico redutor.
Ítrio (Y)	Capacitores, fósforos, radares, Em <i>laser</i> de ítrio-alumínio; supercondutores de alta temperatura; em vanadato de ítrio como receptor do európio (pigmento vermelho em tubos de raios catódicos); filtro de microondas de ítrio-ferro.
Escândio (Sc)	Indústria aeroespacial, bastões de baseball, aplicações nucleares, iluminação (adicionado ao mercúrio em lâmpadas a vapor) e supercondutores.

\* *Mischmetal* – Liga de elementos de terras raras utilizada na remoção do oxigênio e enxofre, na purificação do aço, e em pedras de isqueiro

Os ETR's tem diferenciadas características eletrônicas, ópticas, magnéticas e catalíticas (BRASIL, 2013), o que os torna aplicáveis em variados produtos de alta tecnologia, como computadores e celulares, como detalha a Tabela 3.

Tabela 3: ETR's utilizados em produtos eletrônicos. Fonte: SENADO FEDERAL (BRASIL, 2013)

Produto eletrônico		ETR presente na composição
Disco rígido		Nd, Ce
Computador	Monitor	Y, Eu
	Diodo emissor de luz	Y, Eu, Ce
	Câmera	La
Celular	Lente	La
	Alto-falante com ímãs terras raras	Tb, Nd, Gd, Sm, Yb, Pr, Dy
	Acessório alto-falante	Nd, Sm

Na Tabela 3 todos os elementos são ETR's leves com exceção de Y, Dy, Yb e Tb.

O crescente aumento de consumo por produtos e compostos de ETR é uma mola propulsora para sua exploração mineral, porém a obtenção de ETR de fontes secundárias também tem sido pesquisada a partir de diversos produtos usados, reciclando esses elementos, reaproveitando-os em novos produtos e essas possibilidades serão destacadas no próximo tópico.

### 2.3. RECICLAGEM DE TERRAS RARAS EM DIFERENTES MATERIAIS USADOS

Segundo FERREIRA e NASCIMENTO, 2013, existe a possibilidade de modos de reciclagem de terras raras em ímãs, baterias de hidreto metálico de níquel (NiMH) e em fósforos de lâmpadas luminescentes. A Tabela 4 resume quais ETR's são possíveis de recuperar dos materiais apresentados.

Tabela 4: Recuperação e purificação de ETR em alguns produtos. Fonte: (FERREIRA e NASCIMENTO, 2013)

Produto	ETR recuperado
Ímãs permanentes de ETR	Nd, Pr, Gd, Tb, Dy, Sm
Baterias Ni-MH recarregáveis	La, Ce, Pr, Nd
Lâmpada luminescente	Eu, Tb, Y
Monitor de computador antigo (tubos)	Eu, Y
Pó de polimento de telas de cristal líquido, vidros, espelhos, lentes ópticas,	Ce
Catalisadores de craqueamento catalítico para indústria petroquímica	La, Ce, Pr, Nd

Existem diferentes métodos para reciclagem, cada um com vantagens e desvantagens. O método hidrometalúrgico: é aplicável a todos os tipos de ímãs e a ligas oxidadas e não-oxidadas. As vantagens são que as etapas de processamento são conhecidas, por serem semelhantes àquelas utilizadas na extração das terras raras de minerais. Como desvantagens estão o consumo de grande quantidade de reagentes e a geração de grande volume de água de descarte (FERREIRA e NASCIMENTO, 2013).

O método pirometalúrgico não gera água de descarte e usa menos etapas de processamento de separação. Além disso, é aplicável a todos os tipos de ímãs, exceto os ímãs oxidados. Faz-se fusão do material e extração do metal em estado líquido. Como

desvantagem, consome muita energia, além das escórias eletrocondutoras e de vidro gerarem grande quantidade de resíduos sólidos (FERREIRA e NASCIMENTO, 2013).

O terceiro método é o por extração em fase gasosa que também não gera água residual, geralmente aplicável a todos os tipos de ímãs, a ligas oxidadas e não oxidadas. A desvantagem é devido ao consumo de grandes quantidades de cloro (FERREIRA e NASCIMENTO, 2013).

Metais de terras raras, La e Ce, podem ser recuperados de ânodos de baterias exauridas de Ni-MH recarregáveis, comuns em telefones celulares, por processo hidrometalúrgico dos materiais contidos, obtendo maior concentração de Ce.. Os materiais recuperados através deste método são considerados de alta pureza, podendo ser aproveitados industrialmente (SANTOS *et al*, 2014).

Em lâmpadas fluorescentes, a reciclagem é considerada simples, os fósforos de lâmpadas fluorescentes são fontes das ETR's pesados (Y e Tb) e Eu (FERREIRA e NASCIMENTO, 2013; BACILA, *et al* 2014). Alguns dos métodos de separação de ETR possuem patentes, mas essa tecnologia vem tornando-se acessível. A presença de ETR nas lâmpadas fluorescentes possui potencial de valorização para reciclagem evitando extração de recursos naturais não-renováveis (BACILA, *et al* 2014). Pesquisas sobre os métodos estão ainda em fase inicial. O maior problema é a remoção completa de mercúrio (FERREIRA e NASCIMENTO, 2013).

No Brasil, a destinação do pó de fósforo obtido para reciclagem de lâmpadas fluorescentes vai para fábrica de cerâmica, indústria de tintas e pigmentos (BACILA, *et al* 2014).

É possível recuperar ETR de revestimentos de monitores de computador e de tubos de imagem de televisores coloridos, existem mistura de óxidos e sulfetos de ETR, principalmente európio (FERREIRA e NASCIMENTO, 2013).

#### 2.4. DESTINO FINAL DO LIXO ELETRÔNICO E A LOGÍSTICA REVERSA

Os equipamentos manufaturados eletroeletrônicos são divididos em quatro categorias dentre elas os da linha verde são: desktops, notebooks, impressoras e aparelhos celulares. Eles possuem uma vida útil curta (tipicamente 2 a 5 anos), são equipamentos de pequeno porte (entre 100 g e 30 kg), possuem grande diversidade de componentes e são compostos principalmente por plásticos e metais (ABDI, 2012).

O PNUMA (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente), publicado em 2009, estima que 40 milhões de toneladas de lixo eletrônico sejam geradas no mundo por ano, e se for considerado somente o descarte celulares e impressoras, quase 20 mil toneladas anuais são descartadas no Brasil. O estudo também mostrou que proporcionalmente é o país que mais produz resíduos eletroeletrônicos no mundo.

Seu descarte na natureza deve ser realizado de forma adequada, direcionando este lixo para empresas e cooperativas de reciclagem, ou mesmo para os próprios fabricantes do material, o que inclusive é regulamentado no Brasil (LEAL, 2013; PNUMA, 2015).

Em 2010, foi sancionada a lei 12.305/2010 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Dentre seus desdobramentos, um dos mais importantes é o sistema de logística reversa, que promove a devolução dos resíduos aos próprios fabricantes para que estes façam reuso dos materiais ou descartem o mesmo de maneira adequada (LEAL, 2013).

A PNRS determina a Logística Reversa para produtos eletrônicos desse modo:

“São obrigados a estruturar e implementar sistemas de logística reversa, mediante retorno dos produtos após o uso pelo consumidor, de forma independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de (...) VI - produtos eletroeletrônicos e seus componentes” (Lei 12.305/2010)

Conforme publicação da Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI), há alguns anos certos países estão implantando programas de logística reversa de produtos eletrônicos dentre esses: Espanha (2005), EUA, na Califórnia (2003), França (2006), Portugal (2004), Áustria (2005) e Japão, que é pioneiro nestes cuidados, onde desde 2001 há lei que regulariza o tratamento e define as responsabilidades por coleta, transporte e reciclagem de resíduos desse tipo.

O descarte inapropriado do lixo eletrônico pode se tornar uma fonte de contaminação de metais pesados como chumbo, mercúrio e cádmio ao solo, à água e à saúde humana pois o contato com esses materiais ocorre em lixões ou em locais para seu reprocessamento em estruturas precárias a exemplo disso em países como Ghana, Nigéria, Índia, China, Uganda e Paquistão que importam eletroeletrônicos obsoletos (LEAL, 2013).

Segundo LEITE, 2002, a logística reversa é uma área da logística empresarial que permite o retorno dos bens de pós-venda e de pós-consumo ao ciclo de negócios ou ao ciclo produtivo, agrega valores como: econômico, ecológico, legal, logístico, imagem corporativa positiva. Componentes em condição de uso são destinados à remanufatura e os materiais com condições de revalorização são enviados para a reciclagem industrial. Na impossibilidade de revalorizações, os bens vão para disposição final, encaminhados a aterros sanitários, incinerados ou descartados de maneira mais específica.

Na reciclagem os materiais constituintes transformam-se em matérias-primas secundárias ou recicladas são reincorporadas à fabricação de novos produtos e reintegrados ao ciclo produtivo distinguido em duas categorias: ciclo aberto e o ciclo fechado (LEITE, 2002).

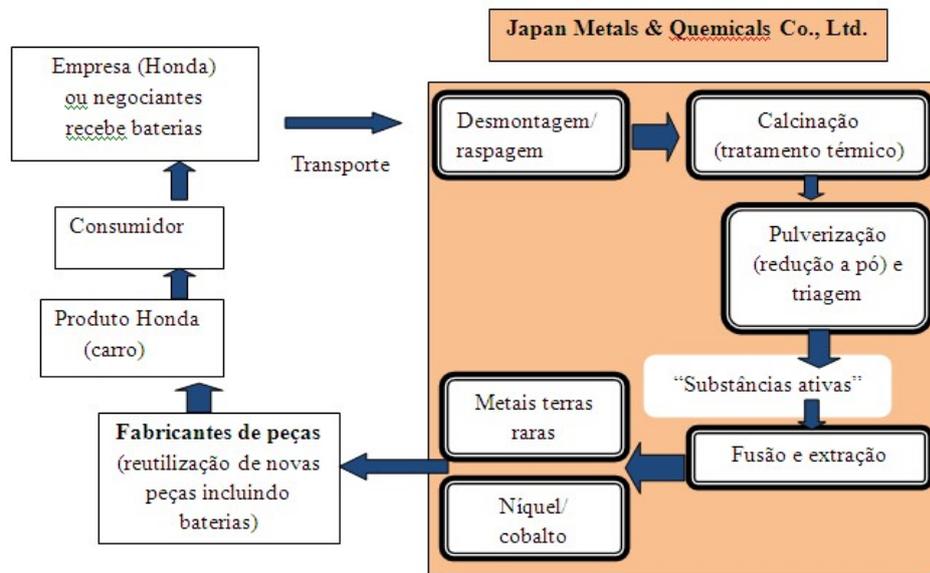
O ciclo aberto caracteriza-se pelo retorno dos materiais extraídos a diferentes produtos daquele original. Já no ciclo fechado os materiais extraídos são substituídos em produto similar ao de origem (LEITE, 2002). Tanto o ciclo aberto quanto o ciclo fechado podem ser adotados para o caso de utilização de metais terras raras reciclados. Empresas japonesas divulgam em suas páginas na internet como estão colocando em prática as duas categorias de ciclos em seus produtos eletroeletrônicos.

No Japão que não detém reservas naturais de minerais de terras raras, empresas incorporam na logística reversa de seus produtos eletrodomésticos e eletrônicos a reutilização de metais terras raras, as gigantes Dowa Holdins, Hitachi, Mitsubishi e Honda são alguns desses exemplos. (TABUCHI, 2010).

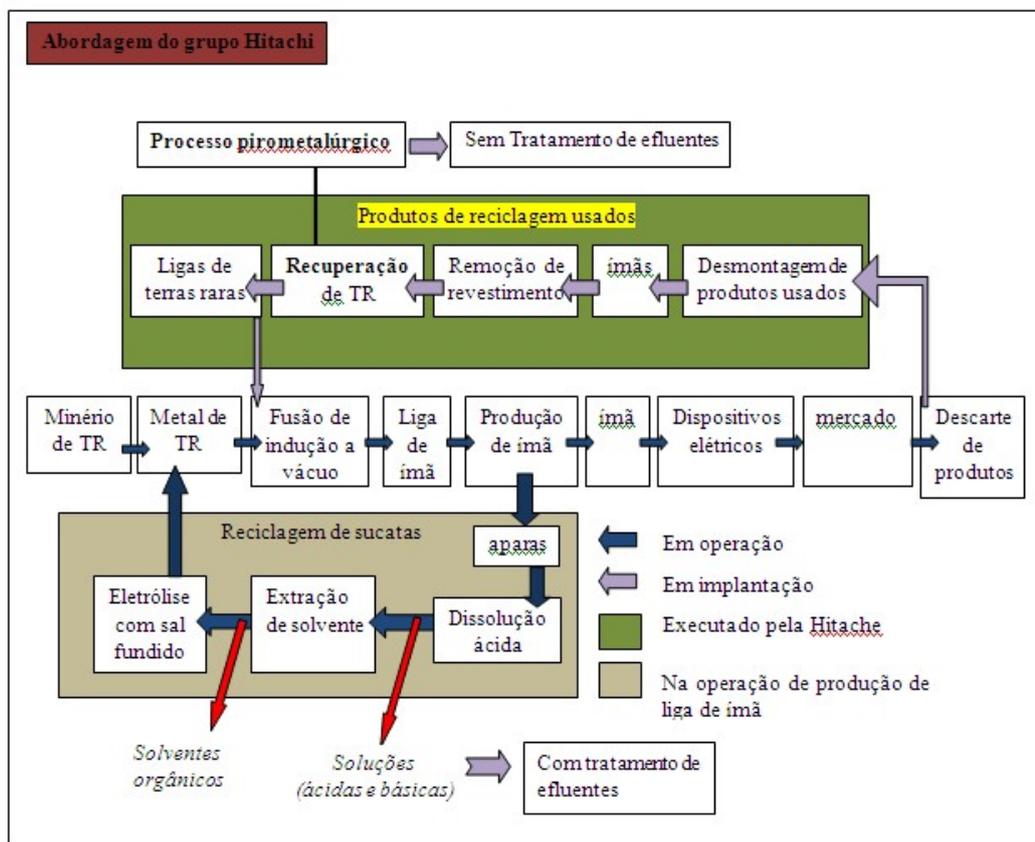
A partir de 2008 a usina de reciclagem de Kosaka, a japonesa Dowa Holdins, começou a recuperar minerais terras raras de produtos vindos de todo o Japão e dos EUA, a empresa vem tentando recuperar Nd usado em motores elétricos e Dy de laser, o governo japonês estima uma denominada “mina urbana” de produtos eletrônicos com cerca de trezentas mil toneladas de terras raras, embora isso seja menor do que a China possua em suas reservas naturais (TABUCHI, 2010).

A partir de 2013 a empresa Honda iniciou a reutilização de metais terras raras em baterias – NiMH. O processo de remoção desses metais envolve a eletrólise com sal fundido aos materiais das baterias e extrai 80% do conteúdo original da bateria (Figura 1).

O grupo Hitachi tem desenvolvido um método pirometalúrgico que usa magnésio fundido no processo de extração de Nd e Dy, e considera esse método de menor impacto sobre o meio ambiente em comparação a outros convencionais porque consome menos energia elétrica e tem melhor rendimento de Dy (Figura 2). (TOMOHIKO e TOMONORI, 2014).



**Figura1:** Fluxograma da logística reversa de baterias de automotivos da empresa Honda em parceria com Japan Metals & Quémicals. Fonte: (Adaptado de [www.metalpedia.asianmetal.com](http://www.metalpedia.asianmetal.com)).



**Figura 2:** Fluxograma do processo desenvolvido pelo grupo da empresa japonesa Hitachi que adota a recuperação pelo processo pirometalúrgico. Fonte: (Adaptado de <http://www.hitachi.com>).

## 2.5. O SETOR EMPRESARIAL CONSUMIDOR DE TERRAS RARAS

Em um levantamento no site da TECHINBRAZIL foi observado um total de 26 empresas no ramo de eletrônicos instaladas no Brasil, 10 são brasileiras, as demais têm origem de países como China, EUA, Holanda, Coreia, Japão e Taiwan. Estas empresas estão localizadas principalmente em Manaus e são na maioria montadoras. Dentre os produtos fabricados e montados estão computadores desktops, notebooks, placas de circuito, iphones, ipads, tablets, acessórios de informática, reprodutores de mídia, entre outros.

Há também empresas de outros ramos instaladas no Brasil que usam ETR em sua produção: na forma de Mischmetal (Pedras de Isqueiros) – Bic, Shaver e Reality Cigars; como Mischmetal (aditivos metalúrgicos) – CSN, Gerdau e Usiminas; utilizando Cério como catalisador automotivo – FCC, Umicore e OG; usando Cério para polimento e descoloração de vidro - Conlumi, Sincavidro e Projeto Cristal; usando Lantânio como estabilizador estrutural de zeólitas - Celta Brasil; Neodímio em ímãs – Koimãs, Imãtec e Raizler; Ítrio e Európio em materiais luminescentes – Biotium; Érbio, Neodímio e Hólmio em Lasers – Lasers Brasil, SOS Laser e LBT Lasers; Lantânio, Európio e Térbio em sondas biológicas – Pamatech, Eckert & Ziegler e Bruker; Gadolínio como agente de contraste - Bayer, Bracco e Guerbet.

## 3. METODOLOGIA

Foram elaborados indicadores para análise da possibilidade de aproveitamento desses elementos em fontes secundárias considerando os produtos eletrônicos como computadores e celulares. Aos 17 elementos foram aplicados os indicadores em forma de pergunta.

A escolha dos indicadores baseou-se nas informações da revisão de literatura, cada indicador possuiu uma resposta sim ou não, para cada resposta a avaliação foi favorável à reciclagem ou não favorável à reciclagem.

Foram 3 categorias de indicadores: técnicos, econômicos e ambientais. Os indicadores técnicos foram: solução técnica desenvolvida para reciclagem em produtos pós-consumo, empresa fabricante de eletrônicos da linha verde instalada no Brasil consumidora do ETR, existência de fontes naturais no Brasil, componente de peças de celular, componente de peças de computador, ETR leve (porque os ETR leves são mais utilizados em eletrônicos), recuperação e purificação desenvolvida em bateria recarregável de celular.

Os indicadores econômicos foram 3: demanda do ETR em produto eletrônico linha verde, demanda do ETR em outro tipo de produto e aumento do preço de venda do kg no mercado internacional entre 2008 e 2015.

As escolhas dos indicadores ambientais foram: processo reciclagem adotado (pirometalúrgico) consome grande quantidade de água, processo reciclagem adotado (pirometalúrgico) gera resíduos sólidos como escórias, processo de reciclagem adotado (pirometalúrgico) consome energia, processo de reciclagem adotado (hidrometalúrgico) consome grande quantidade de água, processo de reciclagem adotado (hidrometalúrgico) gera grande quantidade de efluente, difícil separação do mercúrio na reciclagem, há fontes naturais desse mineral no Brasil e ETR crítico.

## 4. RESULTADOS

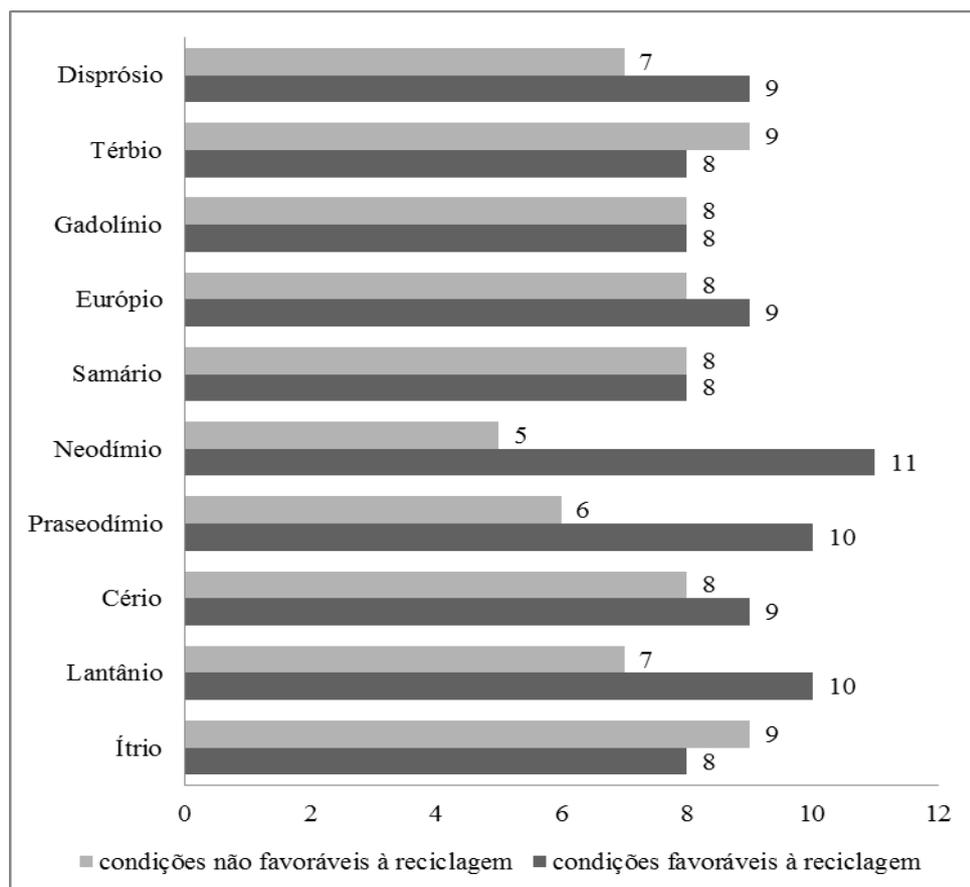
A maioria dos ETR's foi considerada na avaliação, totalizando 10, já que fazem parte da composição das peças de eletrônicos da linha verde (Figura 3). Entre os não avaliados estão: escândio, promécio, hólmio, érbio, túlio, itérbio e lutécio.

Dos ETR's analisados apenas os elementos térbio e ítrio apresentaram número maior de condições não favoráveis à reciclagem em detrimento das que favorecem o seu reaproveitamento.

O elemento térbio, é um ETR pesado, portanto menos disponível na crosta continental, possui técnicas de reciclagem já desenvolvidas para recuperação do material nos produtos em que é aplicado. Apesar da pequena aplicação na linha verde, tecnicamente, pode ser interessante sua reciclagem devido ao fato de que várias empresas instaladas no Brasil necessitam dele em seus produtos.

Seu preço não teve aumento relevante nos últimos anos, mas como seu aproveitamento pode ser realizado em diversos tipos de aplicações, dentro e fora da linha verde, percebe-se uma possibilidade de mercado interessante para reciclagem do térbio.

O elemento ítrio é também ETR pesado, notável que se trata de elemento crítico, podendo sofrer escassez com o aumento da demanda, portanto sob esse aspecto é interessante que se adote a reciclagem.



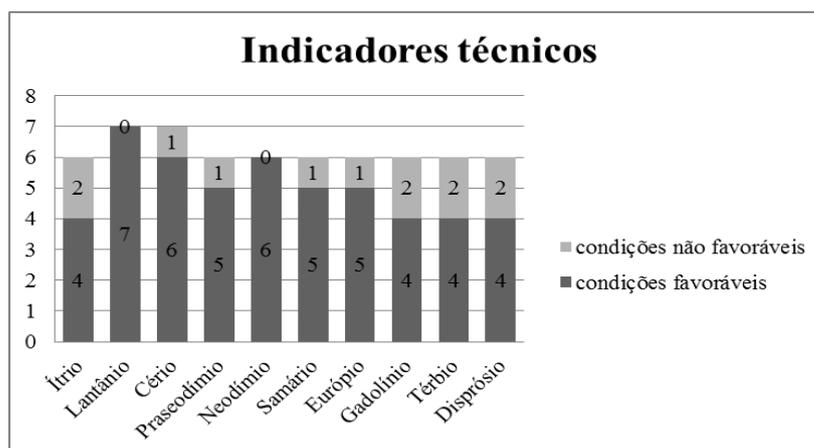
**Figura 3:** Avaliação das condições de reciclagem dos ETR adotando indicadores técnicos, econômicos e ambientais. Fonte: (PRÓPRIA, 2016).

Um fator complicador do processo de reciclagem para os dois elementos é a reciclagem em lâmpadas que exige cuidado redobrado devido presença de mercúrio. Esse problema refletiu na quantificação das condições não favoráveis à reciclagem.

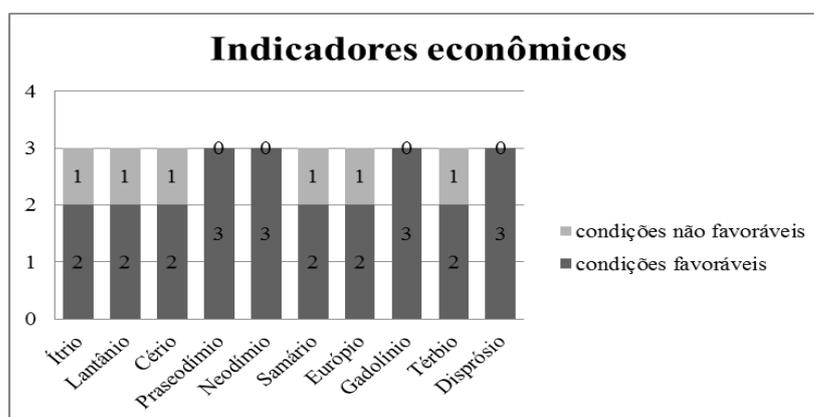
Gadolínio e Samário obtiveram empate em suas condições favoráveis e não favoráveis à reciclagem. Gadolínio é um ETR pesado, já possui soluções de reciclagem desenvolvidas para alguns produtos do qual faz parte. Seu preço de venda aumentou no mercado mundial, tornando-o interessante economicamente para reuso. Sua demanda não é a maior dentre as terras raras, mas como tem sua utilização na linha verde e mais ainda, fora dela, sendo o único ETR utilizado clinicamente como agente de contraste, haverá sempre uma garantia de mercado. Não é avaliado como ETR crítico.

O elemento samário é muito usado em componentes de celulares, mas não tanto em computadores. Economicamente, há alguns fatores que vão contra a reciclagem do Sm. O primeiro deles é a sua abundância na crosta terrestre, não é considerado um ETR crítico no aspecto ambiental O segundo fator é que este elemento não sofreu grande aumento de seu valor no mercado nos últimos anos.

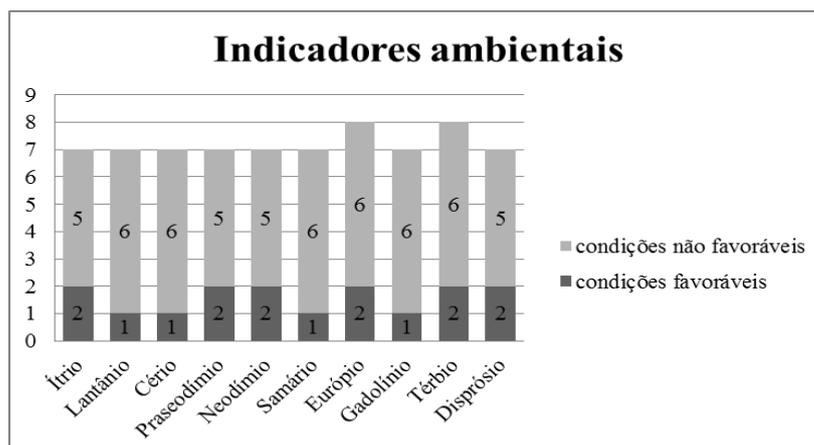
Para os elementos Dy, Eu, Nd, Pr, Ce e La há no total mais condições favoráveis a sua reciclagem considerando indicadores técnicos e econômicos (Figuras 4 e 5), porém para os indicadores ambientais as condições foram não favoráveis à reciclagem (Figura 6), os métodos de reciclagem aqui considerados precisam de uma melhor eficiência nos seus processos.



**Figura 4:** Avaliação dos indicadores técnicos dos ETR's. Fonte: (PRÓPRIA, 2016).



**Figura 5:** Avaliação dos indicadores econômicos dos ETR's. Fonte: (PRÓPRIA, 2016).



**Figura 6:** Avaliação dos indicadores ambientais dos ETR's. Fonte: (PRÓPRIA, 2016).

Foram identificadas algumas variáveis que podem ser correlacionadas em futuros trabalhos, que são: logística reversa, metodologia de reciclagem de ETR, gestão de resíduos sólidos de eletrônicos (informática), empresas de eletrônicos e empresas que usam ETR em seus produtos.

Esse conjunto de variáveis é necessário que seja considerado para um entendimento melhor sobre as dificuldades da implantação no Brasil da reciclagem de ETR em computadores e celulares e não é intuito desse ensaio mostrar todas elas, apenas uma pequena parte de um universo complexo que envolve muitos atores sociais, dentre eles: as empresas do ramo que devem cumprir as normas, o governo com sua política pública necessária, os órgãos do governo dentro de suas atribuições, as universidades com suas pesquisas e o consumidor final com responsabilidade social e consciência ambiental.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nessa abordagem verificou-se parte da dimensão e complexidade que a questão da reciclagem de ETR em eletrônicos apresenta, e que reunir informações para servir de base para uma aplicabilidade desse tipo de ação é necessário, inclusive estudos científicos que façam revisões sobre o tema.

Não foi objetivo desse trabalho esgotar o assunto, mas trazer informações que possibilitem uma reflexão mais crítica sobre a necessidade de o Brasil estimular o reaproveitamento de terras raras a partir dos resíduos, e não apenas ser um país explorador de suas reservas naturais e exportador de matéria-prima como já fez a China. No país precisa haver maior estímulo à tecnologia voltada para o aproveitamento de minerais de fontes secundárias o que evitaria a geração de mais impactos ambientais provocados pela exploração mineral, mas comprovar esse efeito é assunto para outro estudo.

Como foi visto, dos 17 ETR's, 10 são usados na composição de produtos eletrônicos e esse número pode crescer conforme o avanço da tecnologia e inovação. Alguns desses ETR's podem se tornar escassos no mercado, a reciclagem, portanto é uma estratégia a ser adotada. Porém estudos científicos relacionados ao reaproveitamento de ETR de produtos pós-consumo ainda são incipientes no Brasil, com algumas exceções para o caso de lâmpadas fluorescentes, pilhas e baterias que apresentam possibilidades de revalorização desses metais reintegrando-os ao ciclo produtivo.

Estudos científicos relacionados à extração desses elementos a partir de produtos eletrônicos pós-consumo são ainda um desafio para o meio acadêmico e para o setor industrial, já que isso requer tecnologias mais limpas. O meio empresarial de informática, periféricos e celulares parece ser uma caixa preta em questão de gestão de resíduos eletrônicos no Brasil, pois as empresas do setor instaladas no país pouco divulgam ou não divulgam o ciclo de vida de seus produtos, apesar da instituição da Lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos.

A análise estima que o Brasil tem potencial de extração de metais terras raras em seu território e cria-se uma expectativa positiva para o setor de produção mineral. Porém não é tão positiva assim sob a ótica ambiental já que essa atividade expõe áreas naturais aos riscos de serem totalmente destruídas pela atividade mineradora.

No geral analisando a adoção de reciclagem de ETR em eletrônicos pode acontecer sob alguns aspectos técnicos e econômicos e sob o aspecto ambiental a reciclagem também gera impactos, porém em cada caso correções precisam ser constantemente estudadas visando a melhoria contínua.

Além disso, as variáveis já citadas: logística reversa, metodologia de reciclagem de ETR, gestão de resíduos sólidos de eletrônicos de informática, empresas de eletrônicos e empresas que usam ETR em seus produtos, são apenas uma fração do que precisa ser correlacionado para se entender quais são as necessidades do Brasil para se alcançar o funcionamento de uma política de reciclagem desses metais.

O Brasil trilha o caminho de mudanças no contexto de produção de terras raras e isso requer esforços, o setor político e o econômico estão depositando suas atenções apenas no beneficiamento por meio da produção a partir de fontes primárias.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

**ANDRADE, R. H. P.** de. Terras Raras. Sumário Mineral 2014. DNPM/MS, Brasília, v. 34, p. 114-115, 2014. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br>>. Acesso em: 11 mar. 2016.

**BACILA, D. M.; FISCHER K.; KOLICHESK M. B.** Estudo sobre reciclagem de lâmpadas fluorescentes/ Study about fluorescent lamp recycling. Engenharia Sanitária Ambiental (online), Edição Especial. v. 19, 2014. p 21-30. Disponível em: <<http://www.scielo.br>>. Acesso em: 06 fev. 2016.

**BRASIL.** Senado Federal. Terras Raras: Estratégias para o Futuro. Revista Em Discussão. Ano 4. n. 17, set. 2013. Disponível em: <<http://www.senado.gov.br/>>. Acesso em: 28 fev. 2016.

**DOUROJEANNI, M.** Nuvens negras sobre a Amazônia brasileira. O Eco, Rio de Janeiro, 15 jul. 2013. Disponível em: <<http://www.oeco.org.br>>. Acesso em: 21 mar. 2016.

**FERREIRA F. A; NASCIMENTO M.** Terras Raras: Aplicações Atuais e Reciclagem. Série Tecnologia Mineral, 91, CETEM/MCTI, Rio de Janeiro, IV. Título. V. Série. 2013. 72 p. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br>>. Acesso em: 11 mar. 2016.

**FIGUEIREDO, M. C. H.** Introdução à geoquímica dos elementos terras raras. Boletim IG-USP Série Científica, São Paulo, 2016. Disponível em: <<http://ppegeo.igc.usp.br>>. Acesso em: 11 mar. 2016.

**LAPIDO-LOUREIRO, F. E.** O Brasil e a reglobalização da indústria das terras raras. CETEM / MCTI. Rio de Janeiro, 2013. 216 p. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br>>. Acesso em: 12 mar. 2016.

**LEAL, M. L. C. M.** (Coord.). Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos Análise de Viabilidade Técnica e Econômica. ABDI, Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, Brasília, 2013. Disponível em: <<http://www.mdic.gov.br>>. Acesso em: 19 mar. 2016.

**LEE, J. D.** Química inorgânica um novo texto conciso. São Paulo. Blucher. 3ª ed. 1980.

**LEE, J.D.** Química inorgânica não tão concisa. São Paulo. 5ª ed. Blucher. 1999.

**MARTINS, C; LIMA, P.C.R; TEIXEIRA, L da S. TEIXEIRA, M. P. FILHO, A. P. de Q.** Minerais Estratégicos e Terras-Raras. Centro de Documentação e Informação. Edições Câmara. Brasília. 2014.

**MECHI, A.; SANCHES, D. L.** Impactos ambientais da mineração no Estado de São Paulo. Estudos avançados, São Paulo, v. 24, n. 68, p. 209-220, 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br>>. Acesso em: 18 mai. 2016.

**PNUMA.** Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. Waste crime: waste risks gaps in meeting the global waste challenge. 2015. Executive Summary. UNEP. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org>>. Acesso em: 19 mar. 2016.

**PNRS.** Política Nacional de Resíduos Sólidos. 2010. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm)>. Acesso em: 19 mar. 2016.

**ROCIO, M. A. R; SILVA, M. M. da; CARVALHO, P. S. L. de; CARDOSO, J. G. da R.** Terras-raras: Situação Atual e Perspectivas. BNDES Setorial. Rio de Janeiro, p. 369-420, 2012. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br>>. Acesso em: 12 mar. 2016.

**SANTOS, V. E. de O dos.; CELANTEB, V. G.; LELISA, M de F.; FRETASA, M. B. J. G. de.** Método Hidrometalúrgico para Reciclagem de Metais Terras Raras, Cobalto, Níquel, Ferro, e Manganês de eletrodos negativos de baterias exauridas de Ni-MH de telefone celular. Química Nova, São Paulo, v. 37, n. 1, p. 22-26, 2014. Disponível em: <<http://www.scielo.br>>. Acesso em: 06 fev. 2016.

**SANTOS, dos A. J. G.** Regulamentação e decisões na avaliação de impacto ambiental dos resíduos contendo radioatividade. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2005, Santos, SP. 2005. Disponível em: <<http://www.ipen.br>>. Acesso em 18 mai. 2016.

**SERRA, O. A.** Terras raras - Brasil X China. Journal of the Brazilian Chemical Society, São Paulo, v. 22, n. 5, p. 811-812, mai. 2011. Disponível em: <<http://www.scielo.br>>. Acesso em: 27 fev. 2016.

**TABUCHI, H.** Japan Recycles Minerals From Used Electronics. International New York Times. Kosaka, Japão, 4 out. 2010. Disponível em: <<http://www.nytimes.com>>. Acesso em: 23 mar. 2016.

**TEIXEIRA, M.** Maiores fabricantes de eletrônicos no Brasil. TechnBrazil. 2015. Disponível em: <<https://technbrazil.com.br>>. Acesso em: 18 mai. 2016.

**TOMOHIKO, A; TOMONORI, S.** Recycling Process for Rare Earth Magnets in End of Life Electric Products. Presentation at TMS 2014. San Diego, USA. 2014. Disponível em: <<http://www.hitachi.com>> Acesso em: 23 mar 2016.

**VIEIRA, E. V.; LINS, F.F.** Concentração de minérios de terras raras: uma revisão. Série Tecnologia Mineral, 73. CETEM/MCTI. Rio de Janeiro. 1997. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br>>. Acesso em: 12 mar. 2016.