

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

SELENE JAVIMCZIK DA SILVA

**Metais terras raras e discos rígidos de computador: quanto o Brasil perde com a ausência de reciclagem de eletrônicos?**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Porto Alegre  
Dezembro de 2015

SELENE JAVIMCZIK DA SILVA

**Metais terras raras e discos rígidos de computador:  
quanto o Brasil perde com a ausência de reciclagem de  
eletrônicos?**

Trabalho de Conclusão apresentado ao curso de Engenharia Ambiental, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheira Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Hugo Marcelo Veit

Porto Alegre  
Dezembro de 2015

SELENE JAVIMCZIK DA SILVA

## **Metais terras raras e discos rígidos de computador: quanto o Brasil perde com a ausência de reciclagem de eletrônicos?**

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em **07/12/2015** pela Comissão avaliadora constituída pelos professores:

Banca Examinadora:

.....  
Prof. Dr. Hugo Marcelo Veit – DEMAT/UFRGS

.....  
Prof. Dr. Andrea Moura Bernardes – DEMAT/UFRGS

.....  
Prof. Dr. Ivo André Homrich Schneider – DEMIN/UFRGS

Conceito:. A

Dedico este trabalho a meus pais, Mário e Tânia,  
pelo apoio incondicional durante toda a jornada chamada Vida

## Agradecimentos

Agradeço inicialmente pela oportunidade de estudar em uma universidade pública federal e de excelência, como a UFRGS.

Agradeço ao Prof. Dr. Hugo Marcelo Veit, orientador desse trabalho, pelo apoio, orientação, dedicação e paciência. Agradeço também pela Bolsa de Iniciação Tecnológica e oportunidade de me aprofundar mais na área de reciclagem de eletrônicos.

Agradeço a todos os bons professores que tive ao longo dessa caminhada acadêmica. Graças a eles pude entender melhor as complexidades da esfera ambiental e seus ensinamentos servirão de base para uma carreira profissional íntegra e de excelência.

Agradeço à equipe do LACOR (professores, doutorandos, mestrandos, técnicos e bolsistas) por contribuírem de alguma forma para essa pesquisa, seja compartilhando conhecimento, amizade ou simplesmente zelando pela organização e adequado funcionamento do laboratório.

Agradeço aos meus colegas de curso pela companhia durante esses anos todos de Engenharia.

Agradeço a todos que doaram os HDs, contribuindo para que esse trabalho se concretizasse.

Agradeço o carinho e apoio de todos meus amigos, internos ou externos a UFRGS, e familiares que estiveram presentes e acompanharam essa jornada.

Agradecimento especial a Tábatha Dalposso Machado pela amizade construída ao longo da Engenharia Ambiental, por compartilhar dos mesmos dramas e sentimentos que eu. Conseguimos segurar esse forninho!

Por último e mais especial de todos os agradecimentos. Agradeço aos meus pais e ao meu irmão por todo carinho, amor, respeito e valores transmitidos durante toda minha vida. Agradeço também pelo infinito incentivo a sempre ser uma pessoa melhor, aprendendo com cada situação da vida. Agradeço mais ainda pela paciência dedicada em todos os meus finais de semestre e por aturarem meu estresse e mau humor característicos da época.

*A satisfação está no esforço, não na conquista.*

*Esforço completo significa vitória completa.*

Mahatma Gandhi

## Resumo

A produção e o uso crescentes de equipamentos eletrônicos, principalmente computadores, associados com a cultura da obsolescência programada geram grandes quantidades de resíduo eletrônico. Computadores são feitos de diferentes materiais, como polímeros, cerâmicos e diversos metais: alumínio, cobre, ouro e terras raras, estando estes presentes particularmente em discos rígidos. Apesar da abundância de alguns desses metais, os processos de mineração e extração são bastante custosos do ponto de vista econômico e ambiental. Logo, este trabalho tem como objetivo analisar as dificuldades encontradas na gestão de resíduos eletrônicos no Brasil, realizar a caracterização dos discos rígidos e estimar as vantagens ambientais e econômicas da reciclagem desse material. Para isso, os discos rígidos foram coletados, desmontados e pesados e seus componentes foram caracterizados por FRX e EDS. Basicamente, há dois tipos de carcaças, um grupo feito com uma liga de aço inox e outro grupo feito por uma liga de alumínio. Níquel está presente nos discos de gravação e no braço atuador. Os ímãs permanentes, objetos principais estudados nesse trabalho, são feitos por aproximadamente 40% de neodímio e de ferro, e alguns outros contêm também praseodímio. Baseado nos dados da caracterização, as perdas foram calculadas e estima-se que o Brasil poderia receber mais de US\$ 7 milhões brutos anualmente na reciclagem de discos rígidos e exportação de matéria-prima, ao invés de exportação de sucata.

*Palavras-chave: discos rígidos, reciclagem, equipamentos eletrônicos, terras raras.*

## Abstract

The increasing production and use of electronic equipment, mainly computers, associated with the culture of planned obsolescence generates a large amount of electronic waste. Computers are made of different materials, such as polymers, ceramic and several metals: aluminium, copper, gold and rare earth, being the last one present particularly in Hard Disk Drives (HDDs). Despite the abundance of some of these metals, the mining and extraction processes are very expensive from an economic and environmental perspective. Thus, this work intends to analyse the difficulties founded in waste of electronic equipment management in Brazil, perform a characterization of the hard disks and estimates the economic and environmental advantages of recycling this material. For this, HDD were collected, disassembled and weighted, the components were characterized by XRF and EDS. Basically, there are two types of frames in HDD, a group made of austenitic stainless steel alloy and another made of aluminium alloy. Nickel is present in disks and actuator arm. The permanent magnets are made of approximately 40 percent of neodymium and iron, praseodymium was found in some samples. Based on the data characterization, the losses were calculated and it is estimated that Brazil could receive more than US\$ 7 million gross annually in HDDs recycling and raw material export rather than scrap export.

*Keywords: Hard Disk Drives, recycling, electronic equipment, rare earth.*

## Lista de Figuras

Figura 1: Evolução da venda de computadores no Brasil	16
Figura 2: Tabela periódica dos elementos	19
Figura 3: Reservas mundiais de terras raras	20
Figura 4: Produção de óxidos de terras raras no mundo	21
Figura 5: Figura 5: disco rígido desmontado	36
Figura 6: a) carcaça do tipo I – aço inox; b) carcaça do tipo II – alumínio.	41
Figura 7: Composição dos discos de gravação	41
Figura 8: a) composição do disco de tipo A e b) do disco tipo B.	42
Figura 9: Composição do braço atuador.	42
Figura 10: Composição do motor.	43
Figura 11: Composição dos anéis metálicos.	43
Figura 12: Composição dos ímãs com praseodímio e neodímio.	44
Figura 13: Composição dos ímãs contendo neodímio.	44
Figura 14: Composição do ímã de Fe-Ni.	45

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Inventário de ciclo de vida para produção de TR.	24
Tabela 2: Impactos ambientais da produção de OTR específicos.	24
Tabela 3: Consumo de energia na produção de metais	26
Tabela 4: Resultados da análise de EAA.	39
Tabela 5: Massa média das peças dos HDs de desktop.	40
Tabela 6: Massa média das peças dos HDs de notebook	40

## Lista de abreviaturas e siglas

ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABELPRE	Associação Brasileira de Empresas De Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ABINEE	Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
CEI	Comunidade dos estados independentes
CEMPRE	Compromisso Empresarial para a Reciclagem
EAA	Espectrometria de Absorção Atômica
EDS	Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X
ESR	Electro Slag Refining
EUA	Estados Unidos da América
FEAM	Fundação Estadual de Meio Ambiente de Minas Gerais
FRX	Fluorescência de Raios-X
GEE	Gases de efeito estufa
HDs	Hard Disk Drives
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
ITP	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
LSM	Limite de detecção do método
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MTR	Metais terras raras
NBR	Norma Brasileira
ND	Não detectado
OTR	Óxidos de terras raras
PCI	Placas de circuito impresso
PGRS	Plano de gerenciamento de resíduos sólidos
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
REEE	Resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos
RPM	Rotações por minuto
TRL	Terras raras leves
TRP	Terras raras pesados

UNEP	United Nations Environment Programme
USP	Universidade de São Paulo
WEEE	Waste of electric and electronic equipment

# Sumário

<b>1 Introdução</b>	<b>13</b>
1.1 Descrição do problema	13
1.2 Justificativa	13
1.3 Objetivos	14
1.3.1 Objetivo geral	14
1.3.2 Objetivos específicos	14
<b>2 Revisão bibliográfica</b>	<b>15</b>
2.1 Resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos	15
2.2 Mineração de terras raras	18
2.2.1 Definições	18
2.2.2 Metais terras raras	18
2.2.3 Produção e extração	21
2.2.4 Impactos	23
2.3 Reciclagem	25
2.3.1 PNRS	27
2.3.2 Panorama brasileiro da reciclagem de REEE	28
2.3.3 Reciclagem de terras raras contidos em REEE	31
<b>3 Metodologia</b>	<b>34</b>
3.1 Caracterização da periculosidade	34
3.2 Desmontagem, pesagem e caracterização química	35
<b>4 Resultados</b>	<b>39</b>
4.1 Caracterização da periculosidade	39
4.2 Desmontagem, pesagem e caracterização química	39
<b>5 Conclusões e considerações finais</b>	<b>47</b>
<b>Referências</b>	<b>50</b>

# 1 Introdução

## 1.1 Descrição do problema

O uso de equipamentos eletrônicos, como os computadores, na sociedade moderna, está se tornando indispensável, visto a grande quantidade de recursos e facilidades oferecidos por eles. O constante avanço tecnológico e a vasta oferta desses equipamentos favorecem a substituição frequente, que por sua vez, resulta numa geração de resíduos tecnológicos nunca antes vista no mundo.

Esses equipamentos possuem diversos materiais em sua composição, entre eles, metais tóxicos e valiosos. Os metais tóxicos podem apresentar risco à saúde humana e biológica quando dispostos de forma inadequada no meio ambiente. Além da poluição, outro fator relevante se refere à perda financeira, ocasionada pela ausência de tecnologia ou interesse em recuperar os metais valiosos, como por exemplo, os metais terras raras contidos em discos rígidos de computador.

A mineração e extração de materiais virgens para a fabricação de novos equipamentos também configura um fator de preocupação, haja vista os graves danos ambientais causados por emissões gasosas, alteração de paisagem e grande consumo de água e produtos químicos.

A gestão eficiente e destinação final adequada, onde se favoreça a reciclagem ou reaproveitamento desses resíduos, constituem uma importante ferramenta na captação de recursos financeiros e diminuição de impactos ambientais causados pela exploração sem limites dos recursos naturais e minerais disponíveis na crosta terrestre.

## 1.2 Justificativa

O Brasil produz quase 100 mil toneladas de computadores obsoletos por ano (UNEP, 2009) e esse resíduo não é bem gerenciado no país. A parcela que não é colocada em aterros ou lixões é enviada a outros países como sucata, para que lá seja reciclada e posteriormente vendida como matéria-prima.

Faz-se necessário, portanto, avaliar o cenário da reciclagem no país, para entender os motivos pelos quais a gestão de resíduos eletrônicos não é eficiente e

fazer um levantamento do potencial de reaproveitamento dos materiais presentes nestes resíduos, em especial nos discos rígidos, tema deste trabalho, e das perdas ocasionadas pela exportação de sucata, ao invés de produção/reaproveitamento de matéria-prima.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo geral

Avaliar as dificuldades enfrentadas pela gestão de resíduos eletrônicos no Brasil e estimar os benefícios econômicos e ambientais da reciclagem de discos rígidos.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Pesquisar e determinar os pontos críticos do sistema de gestão de resíduos eletrônicos no âmbito nacional;
- Realizar a caracterização dos discos rígidos;
- Estabelecer um comparativo entre os metais contidos nos discos rígidos e o quanto se perde com a ausência de reciclagem ou recuperação desse material.
- Indicar possíveis melhorias para tornar a coleta e a logística reversa mais eficientes e incentivar a adoção de tecnologias para recuperação dos metais.

## 2 Revisão bibliográfica

### 2.1 Resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos

Os equipamentos eletroeletrônicos são aqueles cujo funcionamento depende de corrente elétrica ou de campo eletromagnético. São compostos pelas linhas (BARBOZA, 2015):

- Branca (refrigeradores e congeladores, fogões, lavadoras de roupa e louça, secadoras, condicionadores de ar);
- Marrom (monitores e televisores de tubo, plasma, LCD e LED, aparelhos de DVD e VHS equipamentos de áudio, filmadoras);
- Azul (batedeiras, liquidificadores, ferros elétricos, furadeiras, secadores de cabelo, espremedores de frutas, aspiradores de pó, cafeteiras);
- Verde (computadores desktop e laptops, acessórios de informática, tablets e telefones celulares).

Os equipamentos da linha verde, especialmente celulares e computadores, estão presentes no nosso dia-a-dia, seja em casa, no escritório ou na palma da mão. O rápido avanço da tecnologia, aliada ao conceito da obsolescência programada, faz com que esses equipamentos sejam substituídos por aparelhos mais modernos frequentemente. A inovação tecnológica traz diversos benefícios à sociedade, porém, uma de suas graves consequências é a geração de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) ou lixo eletrônico, que se caracterizam por serem equipamentos eletroeletrônicos obsoletos ou em fim de vida útil. (EMPA, 2015; ABDI, 2012).

A geração desses resíduos é potencializada por um modelo de consumismo, marcado por uma necessidade criada pela mídia, impulsionando o consumidor a adquirir, cada vez mais, novos produtos e substituí-los com imensa rapidez (SILVA, et al, 2013). No Brasil, são vendidos anualmente mais de 10 milhões de computadores (desktops, notebooks ou netbooks), segundo a ABINEE (ABINEE, 2015). A figura 1 mostra a evolução das vendas desses equipamentos nos últimos anos. Estima-se que a vida útil média de um computador de usuários corporativos

seja em torno de 2 a 4 anos e de usuários domésticos seja entre 2 e 5 anos (AHLUWALIA, 2007).

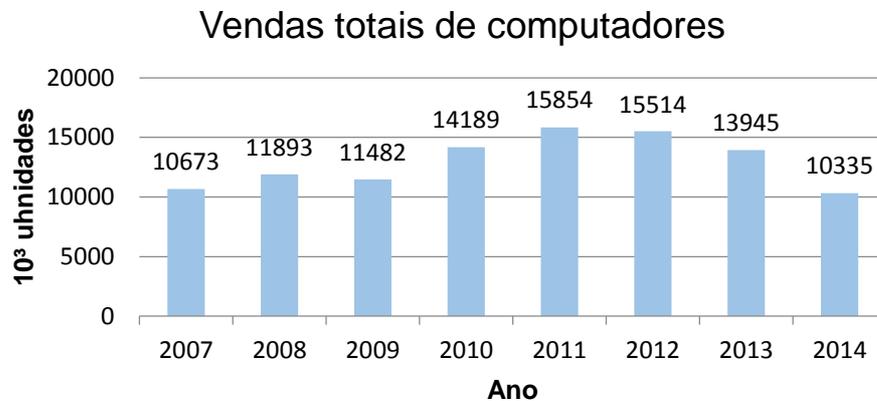


Figura 1: Evolução da venda de computadores no Brasil.

Fonte: ABINEE, 2015

Um estudo realizado pela Fundação Estadual de Meio Ambiente de Minas Gerais (FEAM) indica que haverá um acúmulo de sete milhões de toneladas de REEE de informática entre os anos de 2001 e 2030, no Brasil. (FEAM, 2009). Tal geração é alarmante, visto que o país não tem controle adequado sobre os resíduos domésticos e, muito menos, sobre os resíduos eletrônicos. A posição do Brasil em relação ao destino final de seus resíduos sólidos apresenta a seguinte situação: em 2009, 56,8% dos resíduos foram destinados a aterros sanitários; 23,9% a aterros controlados e 19,3% a lixões (ABELPRE, 2009; SILVA et al, 2013).

No país, são geradas mais de 120.000 toneladas anuais de resíduos de informática, sendo 96.800 toneladas de computadores, 17.200 t de impressoras e 2.200 t de telefones móveis (UNEP, 2009). Em muitos países, inclusive no Brasil, essa sucata é comumente descartada junto ao lixo doméstico, em aterros sanitários, queimada ou mesmo depositada a céu aberto sem qualquer controle ou cuidado com o meio ambiente, provocando a poluição do solo, água e ar e causando doenças na população próxima desses locais. Quando isso acontece, além de poluir o meio ambiente, os componentes ou materiais que compõem esses resíduos estão deixando de se tornar reusáveis, recicláveis ou reaproveitáveis, o que acarreta na perda de materiais valiosos (VEIT et al., 2008).

Em alguns equipamentos são encontrados metais como alumínio, arsênio, cádmio, bário, cobre, chumbo, mercúrio, cromo, entre outros. Todos esses

elementos são potencialmente tóxicos, e resultam em dois tipos de riscos: (ABDI, 2012).

- Contaminação das pessoas que manipulam os REEE. Tanto o consumidor que mantém e utiliza em casa equipamentos antigos, quanto aquelas pessoas envolvidas com a coleta, triagem, descaracterização e reciclagem dos equipamentos estão potencialmente expostos ao risco de contaminação por metais tóxicos ou outros elementos. Os efeitos no organismo podem ser graves. Para reduzir o risco de contaminação, toda a manipulação e processamento devem ser realizados com os devidos equipamentos de proteção pessoal.
- Contaminação do meio ambiente. Os REEE não devem em nenhuma hipótese serem depositados diretamente na natureza ou junto a rejeitos orgânicos. Mesmo em aterros sanitários, o mero contato dos metais tóxicos com a água incorre em imediata contaminação do chorume, multiplicando o impacto decorrente de qualquer eventual vazamento. Penetrando no solo, esse material pode contaminar lençóis subterrâneos ou acumular-se em seres vivos, com consequências negativas para o ambiente como um todo.

Os REEE possuem em sua composição diversos materiais, alguns comuns, utilizados em grande quantidade para compor a estrutura e fornecer design ao equipamento, como o aço, polímeros e vidro. E outros, em proporções reduzidas, como os metais nobres, com significativo valor comercial e de difícil obtenção na natureza. Estes materiais estão presentes nos componentes eletrônicos e encontram-se dispostos como camadas ou sub-partes de elementos eletrônicos. Os equipamentos também possuem substâncias químicas específicas utilizadas para a proteção contra corrosão ou retardamento de chamas (KUNRATH, 2015). Com relação aos metais, esses equipamentos são compostos por aço, ferro, chumbo, cádmio, mercúrio, alumínio e outros metais mais nobres e de maior valor de mercado como cobre, prata e ouro. Em computadores, principalmente em discos rígidos, há também a presença de metais terras raras, um material difícil de ser obtido, devido à ocorrência em baixas concentrações na crosta terrestre e de seu processo de beneficiamento consumir grandes quantidades de energia, água e substâncias químicas.

O disco rígido é um dos produtos que contém terras raras, mais especificamente em seu ímã permanente, feito com uma liga de neodímio, ferro e boro. Esse ímã é responsável pela geração de campo eletromagnético e consequente gravação de dados nos discos. Além dos HDs, as terras raras são importantes ferramentas da indústria de tecnologia, pois são empregadas na geração de energia limpa, principalmente na fabricação de turbinas eólicas e componentes para células fotovoltaicas, baterias de carros híbridos, catalisadores da indústria refinadora de petróleo, vidros capazes de absorver a luz ultravioleta, proteção contra corrosão, condutores expostos a altas temperaturas, entre outros (KOLTUN, 2014).

## 2.2 Mineração de terras raras

### 2.2.1 Definições

Reserva: recurso mineral disponível para lavra e que pode ser produzido economicamente, em função de custos, demanda e preços atuais (GROSSI, 2003).

Depósito mineral: concentração natural de qualquer substância útil, que apresente atributos geológicos de potencial interesse econômico (morfologia, teor, estrutura, composição mineralógica, etc), usualmente variáveis, mas que não necessariamente possuem interesse industrial (GROSSI, 2003).

### 2.2.2 Metais terras raras

Os metais terras raras (TR) são um grupo de 17 elementos com semelhantes propriedades físicas e químicas, composto pelos 15 lantanídeos, Escândio (Sc) e Ítrio (Y), conforme mostrado na figura 2. Com exceção do promécio, devido a sua radioatividade e ocorrência extremamente baixa, e do Escândio, devido a sua ocorrência e propriedades singulares, os demais terras raras são classificados em dois grupos (GOLEV et al., 2014; CHRISTMANN, 2014):

- Terras raras leves (TRL): Lantânio (La), Cério (Ce), Praseodímio (Pr), Neodímio (Nd) e Samário (Sm);
- Terras raras pesados (TRP): Európio (Eu), Gadolínio (Gd), Térbio (Tb), Disprósio (Dy), Hólmio (Ho), Érbio (Er), Túlio (Tm), Itérbio (Yb), Lutênio (Lu) e Ítrio (Y).

**IUPAC Periodic Table of the Elements**

1		Key:																18																			
H hydrogen [1.007 94]																		He helium [4.002 603]																			
3		4														5		6		7		8		9		10											
Li lithium [6.938 4 097]		Be beryllium [9.012 2]														B boron [10.81 10.83]		C carbon [12.00 12.02]		N nitrogen [14.00 14.01]		O oxygen [15.99 16.00]		F fluorine [18.99 18.99]		Ne neon [20.18]											
11		12														13		14		15		16		17		18											
Na sodium [22.99]		Mg magnesium [24.30 24.31]														Al aluminum [26.98]		Si silicon [28.08 28.09]		P phosphorus [30.97]		S sulfur [32.06 32.07]		Cl chlorine [35.44 35.46]		Ar argon [39.95]											
19		20		21		22		23		24		25		26		27		28		29		30		31		32		33		34		35		36			
K potassium [39.10]		Ca calcium [40.08]		Sc scandium [44.96]		Ti titanium [47.87]		V vanadium [50.94]		Cr chromium [52.00]		Mn manganese [54.94]		Fe iron [55.85]		Co cobalt [58.93]		Ni nickel [58.69]		Cu copper [63.55]		Zn zinc [65.38(2)]		Ga gallium [69.72]		Ge germanium [72.63]		As arsenic [74.92]		Se selenium [78.96(2)]		Br bromine [79.90 79.91]		Kr krypton [83.80]			
37		38		39		40		41		42		43		44		45		46		47		48		49		50		51		52		53		54			
Rb rubidium [85.47]		Sr strontium [87.62]		Y yttrium [88.91]		Zr zirconium [91.22]		Nb niobium [92.91]		Mo molybdenum [95.94(2)]		Tc technetium [98.90]		Ru ruthenium [101.1]		Rh rhodium [101.07]		Pd palladium [106.4]		Ag silver [107.87]		Cd cadmium [112.41]		In indium [114.82]		Sn tin [118.71]		Sb antimony [121.76]		Te tellurium [127.6]		I iodine [126.90 126.91]		Xe xenon [131.3]			
55		56		57-71		72		73		74		75		76		77		78		79		80		81		82		83		84		85		86			
Cs caesium [132.9]		Ba barium [137.3]		lanthanoids		Hf hafnium [178.5]		Ta tantalum [180.9]		W tungsten [183.8]		Re rhenium [186.2]		Os osmium [190.2]		Ir iridium [192.22]		Pt platinum [195.08]		Au gold [197.0]		Hg mercury [200.59]		Tl thallium [204.3 204.4]		Pb lead [207.2]		Bi bismuth [208.98]		Po polonium [209]		At astatine		Rn radon			
87		88		89-103		104		105		106		107		108		109		110		111		112		114		116		118		120		122		124			
Fr francium		Ra radium		actinoids		Rf rutherfordium		Db dubnium		Sg seaborgium		Bh bohrium		Hs hassium		Mt meitnerium		Ds darmstadtium		Rg roentgenium		Cn copernicium		Fl flerovium		Lv livermorium		Ts tennessine		Og oganesson		Nh nihonium		Mc moscovium		Lr lawrencium	
57		58		59		60		61		62		63		64		65		66		67		68		69		70		71		72		73		74			
La lanthanum [138.9]		Ce cerium [140.1]		Pr praseodymium [140.9]		Nd neodymium [144.2]		Pm promethium		Sm samarium [150.4]		Eu europium [152.0]		Gd gadolinium [157.3]		Tb terbium [158.9]		Dy dysprosium [162.5]		Ho holmium [164.9]		Er erbium [167.3]		Tm thulium [168.9]		Yb ytterbium [173.1]		Lu lutetium [175.0]		Hf hafnium		Ta tantalum		W tungsten			
Ac actinium		Th thorium [232.0]		Pa protactinium [231.0]		U uranium [238.0]		Np neptunium		Pu plutonium		Am americium		Cm curium		Bk berkelium		Cf californium		Es einsteinium		Fm fermium		Md mendelevium		No nobelium		Lr lawrencium		Rf rutherfordium		Db dubnium		Sg seaborgium			

Figura 2: Tabela periódica dos elementos (adaptado de IUPAC, 2015).

Apesar do nome, os metais terras raras possuem ampla distribuição e ocorrência na crosta terrestre, porém não são encontrados em baixas concentrações nas reservas minerais exploráveis, principalmente os TRP. Cério, por exemplo, é mais abundante do que estanho e ítrio é mais abundante do que chumbo (KOLTUN, 2014). Os TR não ocorrem individualmente na natureza, em geral qualquer mineral terra rara contém todos os outros elementos do grupo, porém em concentrações muito pequenas. Existem três tipos principais de minerais portadores, onde são encontrados cerca de 95% dos depósitos mundiais de terras raras: monazita, bastnasita e xenotímio (GUPTA, 1992).

A monazita é um fosfato geralmente enriquecido com os TRL (Ce, La e Nd), que também pode conter ítrio e tório, um elemento radioativo, cuja ocorrência depende do tipo de formação geológica. A predominância dos TRL se deve às baixas temperaturas e pressão de cristalização desse mineral. Ela ocorre como um mineral acessório em rochas ígneas ácidas, em rochas metamórficas, em certos depósitos aluviais e areias litorâneas e, em alguns casos, ocorre simultaneamente em depósitos de estanho ou ouro. A monazita contendo minerais pesados em depósitos de areia é encontrada em grandes quantidades na Austrália, Brasil, Índia, China, Malásia, África do Sul e EUA (GUPTA, 1992; EPA, 2012). De 1886 a meados da segunda década do século XX, o Brasil foi o maior exportador de monazita. As reservas de monazita litorâneas foram exploradas até meados dos anos 1990. Por conter elementos radioativos, o aproveitamento da monazita para a obtenção de

terras raras foi descartado. As reservas atuais localizam-se nos estados de Minas Gerais e do Rio de Janeiro e outros depósitos minerais significativos, ainda não exploradas, localizadas nos municípios de Presidente Figueiredo (AM) e de Catalão (GO) (ROCIO et al., 2012).

O Xenotímio é um ortofosfato que cristaliza sob pressão e temperaturas mais altas do que as da monazita. Portanto, sua estrutura cristalina favorece a ocorrência de TRP, além de urânio e tório em menores quantidades. Ele ocorre em depósitos de cassiterita na Malásia, Indonésia e Tailândia, em um número pequeno de depósitos aluviais e em uma mina aluvial de estanho, no Brasil, na região amazônica (EPA, 2012; GUPTA, 1992).

A Bastnasita é um fluorcarbonato que praticamente não contém tório, o que favorece sua exploração. Ela é o mais abundante dos três minerais principais e é portadora de TRL. No interior da China, está uma das maiores reservas mundiais de terras raras, onde a bastnasita ocorre associada à monazita e a depósitos de ferro. Estima-se que essas reservas contenham cerca de 36 milhões de toneladas de óxidos de terras raras (OTR), sendo 70% na bastnasita e 30% na monazita (EPA, 2012; GUPTA, 1992).

As principais reservas mundiais de terras raras estão localizadas na China, Brasil, Vietnã, Austrália, Índia, EUA e em outros países como Malásia e na Comunidade dos Estados Independentes (CEI – Armênia, Arzeibaijão, Bielo-Rússia, Kazaquistão, Kirguistão, Moldávia, Rússia, Tajiquistão e Usbequistão), como mostra a figura 3 (ZHANHENG, 2011; USGS, 2015).

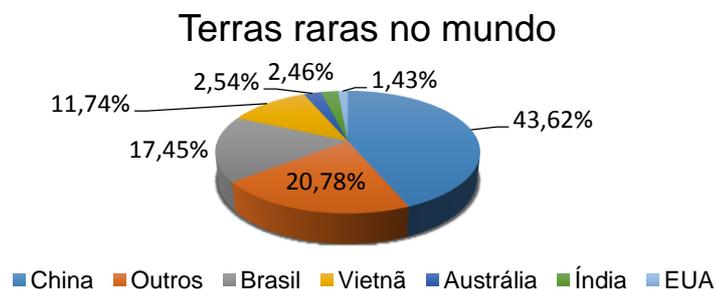


Figura 3: Reservas mundiais de terras raras

Fonte: ZHANHENG, 2011

### 2.2.3 Produção e extração

Os primeiros produtores de terras raras foram Índia e Brasil, até a década de 1940, quando Austrália e Malásia entraram no mercado produzindo monazita a partir de depósitos de aluvião. Os depósitos de bastnasita só começaram a ser explorados entre os anos de 1960 e 1980, época em que o principal produtor foi os Estados Unidos, com a mina de Mountain Pass, Califórnia. A partir de 1980, a China também entrou na corrida pelos terras raras e, em 1988, se tornou o principal produtor mundial, extraindo seus recursos do depósito de Bayan Obo. Desde então, a China domina a produção de terras raras, atingindo cerca de 97% do mercado em 2010, com 130 mil toneladas de óxidos de terras raras (OTR) produzidos, conforme a figura 4 abaixo (KOLTUN, 2014; ROCIO et al., 2012).

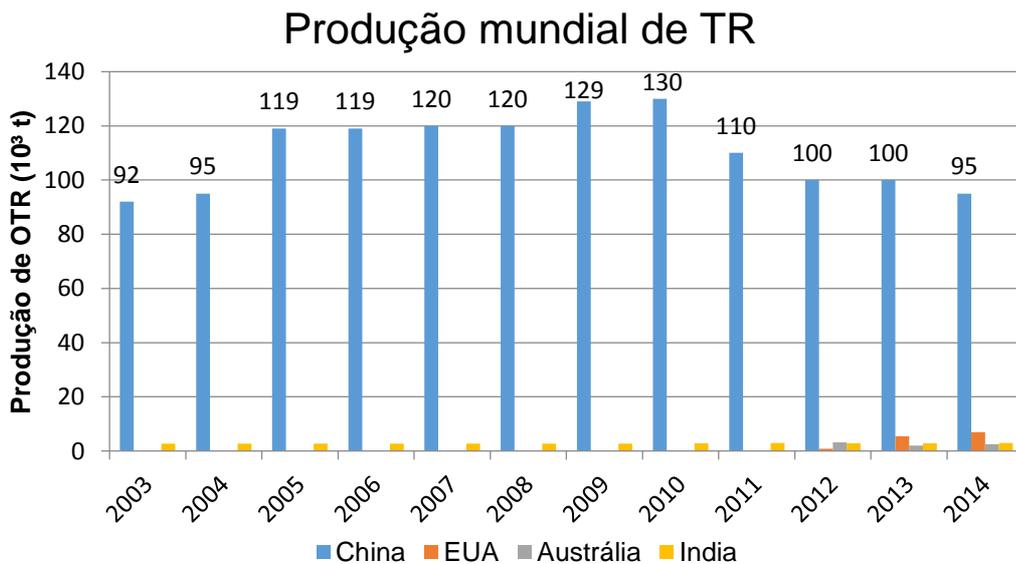


Figura 4: Produção de óxidos de terras raras no mundo

Fonte: ROCIO et al, 2012; USGS, 2015

Por muitos anos, a China foi considerada um fornecedor confiável de terras raras, deste modo fabricantes e usuários finais, incluindo o Departamento de Defesa dos EUA, não se preocuparam com seu quase monopólio. Essa percepção mudou abruptamente no final dos anos 2000 quando a China começou a instituir reduções significativas em suas quotas de exportação anual, o que levou ao aumento de preços e deixou diversos importadores alarmados no mundo todo (LOONEY, 2011). Algumas razões para essa decisão do governo chinês incluem a preocupação do

governo em ter suprimento suficiente no futuro para suas próprias indústrias, apesar das reservas substanciais do país. Outra razão seria de que o governo recentemente começou a reivindicar um maior controle sobre as indústrias de terras raras, através de exigências de medidas de proteção ambiental. Um terceiro motivo inclui o fato das indústrias de fabricação de bens contendo terras raras serem bastante lucrativas, da ordem de 4,8 trilhões em 2010, o que levou o governo chinês a tentar atrair mais indústrias para seu território, ao invés de exportar matéria-prima (SEAMAN, 2010; STEGEN, 2015).

A concentração de óxidos de terras raras nos depósitos de Bayan Obo (China) é de aproximadamente 6%, ou seja, a cada 100 kg de minério extraído, 6 kg são óxidos de terras raras, resultando em grandes quantidades de rejeitos gerados no processo. Em Mountain Pass (EUA), a concentração média de OTR é de 8%, enquanto que nos depósitos brasileiros esse valor é de aproximadamente 4,4%, na Austrália está em torno de 11% e no Canadá 3%, em média (CASTOR, 2006).

A mina de Bayan Obo, China, a maior do mundo em produção de terras raras, também contém aproximadamente 1,5 bilhão de toneladas de ferro (em média 33% de óxido de ferro) e 1 milhão de toneladas de nióbio (em média 0,13%). Os principais minerais de Bayan Obo são monazita e bastnasita (KOLTUN, 2014). Para obtenção dos metais terras raras, o mineral é extraído da jazida, cominuído, beneficiado por processos magnéticos, gravimétricos ou flotação e, então, submetido a processos de recuperação e concentração dos metais ou seus compostos (XIE et al., 2013). A pequena diferença de solubilidade dos metais terras raras, associada a sua formação complexa, contribuem para a dificuldade na separação. Usualmente, as técnicas de separação são compostas por métodos de troca iônica, extração por solvente ou cristalização fracionada. A taxa de recuperação de terras raras no minério é muito baixa, em média 10%. Essa situação é agravada pela baixa concentração de óxidos nos minerais extraídos (aproximadamente 6%), o que resulta numa taxa de recuperação líquida de 0,6%, além de elevado consumo de recursos (energia, água, reagentes químicos) e grande geração de resíduos que podem ser tóxicos e causar danos ao ecossistema (KOLTUN, 2014). Depois da separação, ainda há calcinação, processos hidrometalúrgicos, de eletrólise ou pirometalurgia, até que se obtenha o metal terra rara.

## 2.2.4 Impactos

A produção e o uso de terras raras geram diversos impactos ambientais, devido principalmente à dificuldade de separação das estruturas químicas similares e à baixa taxa de recuperação dos elementos. Além do elevado consumo de recursos naturais como água e eletricidade, a mineração causa degradação da paisagem, alteração de regime hidrológico, processos erosivos, emissões gasosas e alteração da fauna e flora local, utilização de ácidos e geração de grandes quantidades de resíduos tóxicos, que podem danificar o ecossistema. Uma das questões mais pertinentes na produção de terras raras é a produção de resíduos radioativos contendo tório, oriundos dos minérios monazita e xenotímio, motivo pelo qual a produção australiana de terras raras teve um declínio acentuado entre 1989 e 1992. Outro impacto a ser levado em consideração é o potencial de bioacumulação na cadeia alimentar, resultado de contaminações por poeira ou de cursos de água a jusante da mina, principalmente se houver atividade agrícola próximo do local de extração mineral (KOLTUN, 2014; DU et al, 2014; PORTO DIGITAL, 2011).

Para avaliar e quantificar os impactos associados à produção de terras raras, Koltun (2014) realizou a análise do ciclo de vida da cadeia produtiva chinesa. Como parâmetro para o estudo, foi empregado um fluxo de referência para produção de 1 kg de mistura de óxidos de terras raras. Para obtenção de 1 kg de OTR é necessário extrair 166,7 kg de minério de ferro (considerando uma taxa de recuperação líquida de 0,6%). Com base nesse padrão, o autor obteve o inventário de ciclo de vida de energia, consumo de água e impacto da mineração e separação dos óxidos sobre o aquecimento global, através de emissões de gases de efeito estufa (GEE) em equivalentes de CO<sub>2</sub> (eq Kg CO<sub>2</sub>) e depleção de recursos, como mostra a tabela 1.

Na tabela 1, é possível observar que o consumo de energia e emissões de GEE para a extração de OTR é muito maior para a monazita do que para a bastnasita, devido ao processo de separação de urânio, tório e fósforo. Entretanto, para a remoção de OTR da bastnasita é necessário uma quantidade muito maior de energia empregada em aquecimento, quando comparada com a monazita. A utilização de um processo de troca iônica para a separação de OTRP é responsável pelos impactos ambientais mais elevados nessa fase.

Tabela 1: Inventário de ciclo de vida para produção de TR.

Processo	Consumo de energia (MJ)			Impacto ambiental	
	Eletricidade	Aquecimento	Consumo de água (kL)	Emissões de GEE (eq kg CO <sub>2</sub> )	Depleção de recursos (superávit MJ)
Mineração e beneficiamento	4,64	10,11	3,24	3,95	5,46
Extração de OTR da bastnasita	5,6	90	19,09	10,5	13,9
Extração de OTR da monazita	55,6	11,9	18,15	18,3	19,6
Separação de OTR leves	12,6	0	0,58	3,3	2,8
Separação de OTR pesados	15,5	0	8,52	5,5	5,57

Fonte: adaptada de KOLTUN, 2014

Os impactos relacionados com a produção de óxidos individuais constam na tabela 2 abaixo. É possível observar que para a obtenção de európio é necessária uma grande quantidade de energia elétrica e para aquecimento, além de um elevado consumo de água. Já para a produção de 1 kg de óxido de neodímio são necessários 358,45 MJ de energia, ou aproximadamente 100 kWh, o que corresponde ao consumo médio mensal de um ar condicionado 7500 BTUs ligado por 6,5 h/dia. Para essa pesquisa, serão relevantes apenas os óxidos de neodímio e praseodímio.

Tabela 2: Impactos ambientais da produção de OTR específicos

Óxido	Consumo de energia (MJ)			Impacto ambiental	
	Eletricidade	Aquecimento	Consumo de água (kL)	Emissões de GEE (eq kg CO <sub>2</sub> )	Depleção de recursos (superávit MJ)
Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	190,97	251,28	93,69	81,53	91,52
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	154,78	203,67	75,94	66,09	74,18
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3472,18	5686,98	2080,32	1622,04	1883,96
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	37,95	62,16	22,74	17,73	20,59
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	121,12	198,38	72,57	56,58	65,72
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1574,95	2578,98	957,18	738,45	857,4

Fonte: adaptado de KOLTUN, 2014

Os impactos relacionados à etapa de redução dos óxidos a metais foram calculados considerando a redução de OTRL por processos eletrolíticos e a redução de OTRP por processos metalotérmicos. O impacto calculado para essa etapa é influenciado pelo rendimento do processo, cerca de 80% para MTRL e 95% para os MTRP, e corresponde a 5,64 e 5,04 eq CO<sub>2</sub>/kg de MTR, respectivamente (KOLTUN, 2014).

A mineração de terras raras também gera impactos sociais, principalmente sobre a saúde dos habitantes de vilarejos e cidades próximos do local de extração. Em Baotou (Mongólia), houve aumento dos casos de câncer, doenças respiratórias, perdas dentais e poluição de água potável. Estima-se que as minas ao redor de Baotou produzam cerca de 10 milhões de toneladas de efluente altamente ácido e radioativo por ano e que boa parte desse efluente é lançado diretamente na natureza sem qualquer tratamento (MASSARI, 2012).

## 2.3 Reciclagem

Como visto no capítulo anterior, a produção primária de terras raras é extremamente custosa e de grandes impactos ambientais. Desta forma, a recuperação/reciclagem de terras raras presentes em REEE deve ser estudada. Porém, isso está diretamente atrelado à gestão dos REEE, que apresenta diferentes opções disponíveis para o gerenciamento destes resíduos. Essas opções podem ser categorizadas como reuso, reciclagem, incineração e disposição em aterros. A incineração, porém, está sendo evitada ao redor do mundo, visto que essa atividade gera substâncias tóxicas como dioxinas e furanos durante o processo de queima. Estima-se que aproximadamente 70% dos metais tóxicos encontrados nos aterros sejam oriundos de equipamentos eletrônicos, que representam somente 1% dos resíduos descartados (AHLUWALIA, 2007; SLOWINSKI, 1998).

A disposição de computadores em aterros representa perda de recursos valiosos, uma vez que a recuperação desses materiais poderia reduzir a extração de matérias-primas e os impactos ambientais da produção desses equipamentos. A produção primária de metais responde por 10% das emissões globais de CO<sub>2</sub>, já a reciclagem desses materiais possibilitaria economizar de 70 a 95% da energia requerida para matérias-primas, quando comparada com a produção primária,

conforme mostrado na tabela 3 para alguns metais tradicionais (AHLUWALIA, 2007; MIRANDA et al., 2013).

Tabela 3: Consumo de energia na produção de metais.

Metal	Energia empregada na produção de 1 t		Energia poupada em reciclagem	
	Primário (kWh/t)	Secundário (kWh/t)	(kWh/t)	%
Níquel	23000	600	22400	97
Alumínio	17600	750	16850	96
Zinco	4000	300	3700	93
Magnésio	18000	1830	16170	90
Chumbo	3954	450	3504	89
Cobre	2426	310	2116	87
Estanho	2377	360	2027	85

Fonte: adaptado de AHLUWALIA, 2007

As vantagens trazidas ao meio ambiente não se tratam apenas de deixar de despejar resíduos no meio, mas também deixar de extrair matéria-prima para utilizar em um determinado produto, já que a reciclagem trata de reinserir a matéria no ciclo de produção. Além disso, a energia poupada na produção de alguns metais é altamente significativa se comparada aos gastos de energia da fabricação de metais a partir da extração, e a partir da reciclagem (MIRANDA et al., 2013). A geração de energia sempre traz algum impacto à natureza e ao âmbito financeiro, logo, poupar energia é importante sob os pontos de vista ambiental e econômico, já que essa economia representa um menor gasto de capital. Sabe-se que a reciclagem também resulta em impactos negativos ao meio ambiente, mas quando comparada aos impactos positivos da redução de extração de matéria prima e de consumo de energia, no geral, todo o impacto negativo pode ser considerado mínimo em relação à disposição em aterros (AHLUWALIA, 2007).

Diversos países já alteraram a legislação para incentivar ações de reciclagem, reuso ou reaproveitamento e diminuir o descarte inadequado ou desnecessário, principalmente de metais valiosos. A União Europeia, por exemplo, criou o Fórum WEEE, uma associação de 33 sistemas de coleta e recuperação de resíduos elétricos e eletrônicos. Sua missão é proporcionar uma plataforma para a cooperação e intercâmbio de melhores práticas, e com isso, aperfeiçoar a eficácia das operações das organizações membros, enquanto se esforça para a excelência e melhoria contínua do desempenho ambiental. O Fórum WEEE também pretende ser

um centro de competência que permite aos membros fazerem contribuições construtivas para o debate geral em questões de política de resíduos (WEEE Forum, 2015).

Nos países desenvolvidos este tema tem sido vastamente estudado e um dos fatores do sucesso dos sistemas de gerenciamento de REEE se deve ao fato de a legislação vigente adotar o princípio da responsabilidade estendida do produtor. Isso leva o fabricante a desenvolver equipamentos a partir do conceito de ecodesign, investir em pesquisas de reciclagem dos materiais e adotar a logística reversa (PEREZ, 2011), assim como aumentar a restrição de uso de substâncias tóxicas na fabricação dos equipamentos eletrônicos (FRANCO, 2011). No Brasil a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS tem um papel similar, ou seja, tenta melhorar a gestão dos diversos tipos de resíduos, entre eles os eletroeletrônicos.

### 2.3.1 PNRS

Em agosto de 2010 foi promulgada a Lei 12.305, instituindo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). A PNRS reúne o conjunto de princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações adotadas pelo Governo Federal, isoladamente ou em regime de cooperação com Estados, Distrito Federal, Municípios ou particulares, com vistas à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos (ABDI, 2012).

Alguns de seus princípios englobam a ideia do poluidor-pagador, da prevenção e precaução, do desenvolvimento sustentável, da responsabilidade compartilhada e principalmente a visão sistêmica na gestão de resíduos sólidos. Entre seus objetivos, podemos destacar (BRASIL, 2010):

- Proteção da saúde pública e da qualidade ambiental;
- Não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos;
- Estímulo à adoção de padrões sustentáveis de produção e consumo de bens e serviços;
- Adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas como forma de minimizar impactos ambientais;
- Redução do volume e da periculosidade dos resíduos perigosos;

- Incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados;
- Estímulo à implantação da avaliação do ciclo de vida do produto;
- Incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético.

Ela determina que a união, os estados e os municípios deverão elaborar um Plano de Resíduos Sólidos, onde constem o diagnóstico e a situação atual dos resíduos, a proposição de cenários, as metas de redução, reciclagem e de aproveitamento energético, medidas para incentivar a gestão regional, estabelecimento de logística reversa, além de normas e diretrizes para a disposição final de rejeitos e os meios a serem utilizados para a fiscalização.

Dessa forma, a aprovação da PNRS começa a exercer pressão legal sobre diversos atores da sociedade no Brasil. Mesmo sem estar totalmente regulamentada, a PNRS ressalta a necessidade de uma mudança radical na postura de toda a cadeia produtiva sobre os processos de geração e destino de resíduos e, inclusive, os REEE. Neste processo, um dos atores fundamentais são as organizações, pois estas representam grande parte do volume de compra de equipamentos eletrônicos e, conseqüentemente, importantes geradores de REEE (BRASIL, 2010; SANTOS et al., 2014).

### 2.3.2 Panorama brasileiro da reciclagem de REEE

O Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) afirma que o reaproveitamento de material descartado no Brasil movimentava cerca de R\$ 8 bilhões só com aço, alumínio, papel, plástico e vidro, tendo potencial para gerar R\$ 20 bilhões por ano (IPEA, 2010). Entre as vantagens econômicas que a reciclagem apresenta, a mais visível é a reinserção de material no ciclo de produção como matéria-prima reaproveitável, basta que haja investimentos no setor da recuperação de metais presentes nesse resíduo eletrônico (MIRANDA et al., 2013).

As empresas do segmento de reciclagem de resíduo eletrônico presentes em território nacional não fazem a recuperação de todos os componentes. Elas atuam na logística reversa e realizam processos mecânicos de separação, por serem mais

simples e exigirem equipamentos mais baratos. O material separado e processado é enviado para recuperação em outras companhias, porém no exterior, principalmente para a Bélgica. Segundo a ABDI, atualmente o Brasil exporta material de alto valor agregado (contendo inclusive ouro e outros metais preciosos) a preço similar ao da sucata comum de REEE (ABDI, 2012). Para evitar tal evasão de material, é necessário investir em tecnologia que possibilite o aumento da eficiência da reciclagem, e assegure a extração desses materiais em solo nacional.

SILVA et al. (2013) realizaram um estudo sobre a logística reversa na cidade de Natal e constataram que as empresas encontram-se despreparadas em termos de infraestrutura e informação, no que diz respeito ao manejo dos resíduos eletrônicos, uma vez que a maioria delas não possui PGRS (plano de gerenciamento de resíduos sólidos) ou articulações com fabricantes que possuem políticas de incentivo de retorno dos produtos pós-consumo. Outro ponto de destaque encontrado pelos autores se refere à falta de informação quanto à PNRS, visto que a maioria dos empresários ainda não tem total conhecimento da lei e de seu impacto nos diversos setores do comércio e da indústria.

Para a ABDI (2012), o grande desafio da logística reversa reside no custo associado à operacionalização do sistema em um país de extensão continental e com suas particulares complexidades logísticas. É sabido que qualquer sistema que seja estabelecido incorrerá em maiores dispêndios, ora tratados como custos quando apreciados sob a ótica puramente econômica, ora encarados com investimento necessário para um mundo sustentável.

A ABINEE (2011) considera o mercado cinza (produtos ilegais e piratas) como o maior desafio da lei de resíduos sólidos, visto que não é justo impor a responsabilidade de promover a logística reversa de produtos ilegais e metas à indústria instalada no país (KOBAL et al., 2012).

Os fabricantes de produtos de informática no Brasil já estão adotando algumas medidas para diminuir seu impacto ambiental na produção ou no final da vida útil de seus equipamentos, porém as práticas ainda são muito incipientes e precisam ser melhor desenvolvidas. As empresas Dell e a Itautec adotam procedimentos similares com o emprego de tecnologias ambientalmente adequadas para reciclagem de equipamentos de informática, promovendo o descarte adequado dos rejeitos. A Itautec se preocupa ainda com as embalagens utilizadas nos produtos novos, diminuindo o percentual de material empregado nessa etapa. A IBM

e a HP adotam a campanha *Trade in*, onde utiliza o equipamento usado como desconto na compra de um equipamento novo, desenvolvem produtos que facilitam a desmontagem para agilizar o processo de separação de materiais, reaproveitamento e envio destes para a reciclagem. A empresa Positivo, por sua vez, trabalha com tecnologias sem o metal tóxico chumbo e com o uso de papel reciclado em embalagens e incentiva a doação de computadores em bom estado de conservação (XAVIER et al., 2010).

FRANCO (2011) identificou em Belo Horizonte (Minas Gerais), através de entrevistas e visitas a cooperativas, total desconhecimento da parte dos catadores de como manipular os REEE e da responsabilidade em recebê-los. As empresas “doam” esse material para as cooperativas, repassando um passivo ambiental sem qualquer responsabilidade. A desmontagem para retirada do material de valor comercial é feita de forma precária, e as pessoas que manipulam desconhecem o potencial tóxico de algumas peças. Outros problemas enfrentados pelas cooperativas estão relacionados à existência das “cooperativas de fachada”, que exploram mão de obra barata, mas não adotam uma postura verdadeiramente cooperativa. Como resultado, todo o setor se enfraquece e perde credibilidade. A falta de incentivo do poder público, em especial na esfera municipal, também é responsável pela precarização do trabalho das cooperativas. Elas poderiam contar com maior capacitação, o que possibilitaria agregar valor nas atividades que desenvolvem (ABDI, 2012).

Outra questão assinalada pela ABDI (2012) é em relação às dificuldades encontradas pelo varejo na coleta espontânea de REEE. Uma delas é o potencial alto custo para manutenção da necessária infraestrutura física de recebimento e armazenagem. Ainda mais delicados são os potenciais problemas decorrentes da regulamentação a respeito dos REEE como resíduos perigosos. A coleta precisa seguir uma série de regulamentações. Por exemplo, o consumidor precisa assinar um termo de doação dos equipamentos dos quais está se desfazendo. Além disso, os estabelecimentos que se dispuserem a receber materiais precisam obter licenciamento ambiental específico considerando que a lei trata os REEE como material perigoso. Nos casos em que o REEE é transportado entre estados diferentes, é preciso também recolher imposto sobre esse resíduo.

KUNRATH (2015) avaliou o perfil de atividades das empresas que lidam com REEE no Brasil e constatou que muitas empresas, principalmente as de menor

porte, não possuem um eficiente sistema de gestão de seus dados. Nestas empresas as informações coletadas por ele estão dispersas e evidenciam a informalidade na contabilização de materiais e produtos. Já nas empresas de grande porte, o sistema de gestão é bem organizado e suas informações são suportadas por softwares empresariais, operados por funcionários de elevado grau de conhecimento de processos e legislação sobre REEE. Essas empresas normalmente possuem vínculos contratuais com outras empresas nacionais ou internacionais. Em sua maioria, estas organizações executam a coleta e centralização dos REEE para posterior envio a outras unidades de reciclagem. Além disso, ele notou que essas companhias tem uma preocupação maior com os possíveis impactos ambientais do processo e com o cumprimento da legislação.

A reciclagem de REEE é um assunto importante tanto do ponto de vista do tratamento de resíduos, quanto da recuperação de metais com valor econômico. A caracterização dos REEE fornece uma base sólida para o desenvolvimento de técnicas de separação eficientes. Os resíduos eletrônicos são, contudo, heterogêneos e complexos em termos de tamanho, tipo, forma de componentes e materiais. É necessário, portanto, um estudo mais aprofundado com o objetivo de entender mais claramente esse tipo de resíduo (CUI, 2012).

### 2.3.3 Reciclagem de terras raras contidos em REEE

Existem diversos métodos para reciclar e recuperar os terras raras contidos na sucata eletrônica. Os principais processos responsáveis por recuperar o neodímio de ímãs permanentes se baseiam em técnicas hidro ou pirometalúrgicas. Pesquisas mais recentes têm evidenciado o uso de hidrogênio como uma tecnologia promissora na reciclagem dos ímãs permanentes.

Binnemans et al. (2013) fizeram um compilado das diferentes tecnologias que foram ou vêm sendo desenvolvidas na recuperação do material dos ímãs. O processo tradicional de recuperação de terras raras a partir dos ímãs utiliza dissolução em ácidos fortes e precipitação seletiva de sulfatos, oxalatos e fluoretos. Porém, essa abordagem requer grandes quantidades de produtos químicos e a precipitação seletiva não impede que impurezas sejam totalmente separadas do material de interesse. O autor dedicou mais atenção a outros processos hidro e pirometalúrgicos e seus resultados encontram-se abaixo:

- ESR – *Electro Slag Refining*: é um processo de refusão e refino de ligas especiais. No processo, a sucata é fundida com um eletrodo consumível ou por adição a um banho fundido. Um fluxo reativo é usado para remover carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio e metais, como AL, Li, Na, etc. Após etapas suficientes de reação e separação, o metal é transferido do cadinho para um molde frio, refrigerado por água. Isso faz com que as impurezas e a escória que ainda estão misturadas à massa flutuem no topo do banho de metal. Essa tecnologia é mais adequada para grandes quantidades de material, preferencialmente o mais isento possível de impurezas. É um processo empregado para reciclar ímãs permanentes, porém se o material está misturado a outros componentes há dificuldade de separar os terras raras dos metais de transição.
- Extração líquido-metal: essa tecnologia foi desenvolvida devido às desvantagens apresentadas pelos processos aquosos e pelo ESR. O objetivo do processo é tratar uma ampla variedade de sucata metálica, produzindo materiais com baixo teor de carbono, nitrogênio e oxigênio e livre de compostos intermetálicos indesejáveis. Ele tenta eliminar a necessidade de extrair um composto inorgânico do metal a partir de uma etapa de redução. A tecnologia é semelhante àquela empregada na extração líquido-líquido, porém ao invés de usar solvente convencional, utiliza solventes metálicos líquidos. O processo consiste na dissolução seletiva da liga de terras raras por outra liga líquida, na qual os terras raras e os metais de transição se distribuem entre duas fases líquidas imiscíveis de metal. Para extrair, por exemplo, o neodímio do ímã permanente, utiliza-se uma liga de magnésio como agente extrator. O aparato de extração é simples, fica fechado durante o processo e o agente extrator circula no interior do vaso de reação devido à diferença de temperatura no interior do equipamento. Além do magnésio, pode-se usar também prata como agente extrator, já que ela é capaz de dissolver Nd, mas não reage com o ferro nem com o boro.
- Fusão direta: a fusão direta de sucata nova e limpa de ímãs para produzir novas ligas magnéticas é dificultada pelo oxigênio e pelo carbono contido na liga. O oxigênio favorece a formação de escória e a perda significativa de terras raras, devido a forte afinidade desses a outros óxidos. Para

remover o carbono e o oxigênio dos imãs, o material deve ser descarbonatado por aquecimento, onde o carbono é convertido a dióxido de carbono, seguido por aquecimento em atmosfera de hidrogênio para reduzir o óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e finalmente ocorrer a redução dos óxidos de terras raras por cálcio metálico.

SPRECHER et al. (2014) E ANGELO (2005) veem a decrepitação por hidrogênio como a tecnologia mais promissora para a reciclagem de HDs. Nesse processo os imãs permanentes são imersos em hidrogênio gasoso, que os desintegra em partículas pequenas. A cobertura de níquel do imã não reage com o hidrogênio da mesma maneira que os demais componentes, então ela pode ser facilmente removida por peneiramento. O pó resultante da reação com hidrogênio pode ser diretamente reprocessado para formar novos imãs, pois o tamanho das partículas no pó é equivalente ao tamanho das partículas após a moagem na produção primária dos imãs. A eficiência desse processo pode chegar até 95% e funciona muito bem para HDs que foram desmontados por corte em máquinas específicas, pois o hidrogênio faz o material magnético virar pó, enquanto os demais componentes ficam intactos, facilitando a separação e eliminando a etapa de desmontagem manual.

## 3 Metodologia

A fundamentação teórica e a investigação do cenário brasileiro da reciclagem de eletrônicos foram construídas a partir de pesquisa bibliográfica em artigos divulgados na plataforma *Science Direct*, trabalhos de conclusão de curso, dissertações de mestrado e teses de doutorado, livros, documentos governamentais e relatórios técnicos de associações ou agências específicas do setor, além de pesquisa em sites de busca acerca do assunto.

A etapa prática exigiu discos rígidos (Hard Disk Drives, ou simplesmente HDs) de computador, dos mais variados tipos e modelos, que já tivessem atingido o final de sua vida útil. A coleta ocorreu a partir de mensagem deixada em redes sociais, contato com familiares e com uma empresa do setor de informática, que recebe esse material e os encaminha para empresa de reciclagem. Ao todo, foram coletadas vinte e oito (28) unidades, sendo quatro (4) delas HDs de notebook e as outras vinte e quatro (24) de computador do tipo desktop.

### 3.1 Caracterização da periculosidade

Inicialmente foi realizada a classificação dos HDs quanto ao tipo de resíduo que eles representam. A NBR 10004/2004 (ABNT, 2004a) estabelece os critérios de classificação de resíduos sólidos e indica que aqueles que não constem em seus anexos sejam classificados a partir da análise do lixiviado do material em questão.

Para a classificação dos HDs em resíduo perigoso ou não, baseou-se na norma NBR 10005/2004 (ABNT, 2004b), que descreve os procedimentos e requisitos elegíveis para a obtenção do extrato. A norma exige que o material sólido seja cominuído a uma granulometria inferior a 9,5 mm. Para isso, três diferentes HDs (dois de desktop e um de notebook) foram moídos em moinho de martelos e peneirados em peneira com abertura menor do que 9,0 mm.

O material obtido foi homogeneizado e extraíram-se duas alíquotas de 100g cada. Essas alíquotas foram adicionadas a dois frascos contendo a solução de lixiviação, representando a amostra A e a amostra B, e colocadas sob agitação em agitador rotativo, a 30 rotações por minuto (RPM) durante 20h, conforme indicado pela norma. Ao final desse tempo, as soluções foram filtradas e de cada filtrado (A e

B) retirou-se uma alíquota para análise de cádmio (Cd), chumbo (Pb), cromo (Cr), prata (Ag) e mercúrio (Hg), através de Espectrometria de Absorção Atômica (EAA), por geração de hidretos para o Hg e de chama para os demais metais, realizada pelo Centro de Ecologia do Instituto de Biociências, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

### 3.2 Desmontagem, pesagem e caracterização química

Os demais HDs foram nomeados de acordo com a marca do fabricante e a quantidade. Antes de proceder com a desmontagem e pesagem, avaliou-se quais eram idênticos, ou seja, que fossem de mesma marca, ano de fabricação, modelo e capacidade. Estes foram removidos das análises com a finalidade de otimizar tempo e economizar recursos, o que resultou na redução de 25 para 18 unidades. Todos os HDs foram então pesados em balança analítica Marte AS2000C, classe II, com precisão de 0,01 g.

A desmontagem das amostras foi realizada manualmente, com chaves do tipo fenda e Torx, de diferentes diâmetros, conforme o tamanho dos parafusos na amostra. Cada peça foi separada, classificada e pesada individualmente, na mesma balança analítica. Calculou-se a composição mássica média dos HDs e suas peças, e a representatividade percentual de cada uma na massa total de um disco rígido. A classificação foi determinada pela autora, conforme segue, e mostrada na figura 5:

- Carcaça (1);
- Disco de gravação (2);
- Braço atuador (3);
- Motor (4);
- Bobina (não consta);
- Anéis metálicos (5);
- Ímã permanente (6);
- Parafusos (7);
- Placas de circuito impresso (PCI) (8);
- Outros (material polimérico ou adesivo) (9).



Figura 5: disco rígido desmontado  
Fonte: a autora

O motor é uma peça que apresenta certa dificuldade na desmontagem, por ser composto de duas partes que se encaixam e alguns ainda possuem um parafuso invertido no centro, unindo as duas peças. Dos 18 motores, 9 puderam ser demontados por completo, onde se separaram as peças externas da bobina contida em seu interior. A bobina foi pesada e a média das massas foi subtraída da massa média total daqueles motores que não puderam ser desmontados por completo.

Os componentes classificados como parafusos, PCI, e outros não foram levados em consideração nas próximas etapas da pesquisa. A fase seguinte consistiu na detecção e quantificação dos metais e ligas presentes em cada peça do HD. Para isso, realizou-se análise de Fluorescência de Raios-X (FRX), com o auxílio do equipamento portátil Niton™ XL3t GOLDD+, da Thermo Scientific, com configuração ajustada para metais gerais (*general metals*). Em cada peça foram analisados dois diferentes pontos. Devido ao pacote de configurações do software do aparelho de FRX não foi possível analisar os ímãs permanentes.

Junto aos ímãs permanentes há colada uma placa metálica, de dimensões ligeiramente maiores do que as do ímã, que serve para estruturar e auxiliar na fixação do material magnético, no interior do HD. Essas placas foram descoladas dos ímãs e desconsideradas nas análises seguintes. Além disso, os ímãs são recobertos por uma fina camada de níquel e fortemente magnetizados. Para não

causar danos aos equipamentos analíticos, os ímãs foram aquecidos em forno de laboratório do tipo tubular, marca Sanchis, durante 30 minutos sob temperatura entre 300 e 340 °C. O uso de um intervalo se justifica pelo fato do forno ser tubular e não aquecer igualmente em toda a extensão, sendo difícil manter constante e precisa a temperatura exata em cada ponto.

O aquecimento proporciona a desmagnetização da peça e auxilia na remoção da camada de níquel, que impede a passagem dos raios-X para camadas mais internas e diminui a precisão das análises. O tempo e a temperatura ideais para a desmagnetização dos ímãs foram determinados por testes realizados pela autora, nos quais algumas amostras foram submetidas a aquecimento em dois intervalos de temperatura: entre 250 e 300 °C e entre 300 e 340 °C, em tempos de 10, 20 e 30 minutos.

DEGRI (2014) afirma que temperaturas num intervalo entre 335 e 500° favorecem a oxidação e corrosão dos ímãs. Dessa forma, procurou-se manter a temperatura entre 300 e 340 °C. Para quantificar os metais presentes nos ímãs permanentes, optou-se por análises de Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS), realizada em equipamento Phenom Pro-X, com Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) acoplado, de forma que fossem avaliados também dois diferentes pontos na amostra.

De posse dos valores da composição das peças individuais, calculou-se a média aritmética geral e desvio padrão da porcentagem de cada metal, em cada grupo de peças. Metais com composição inferior a 5% nas amostras foram agrupados na subcategoria “outros”, na demonstração dos resultados. Calculou-se também a composição mássica média dos HDs e suas peças, e a representatividade percentual de cada uma na massa total de um disco rígido.

Com o resultado da composição, estabeleceu-se um comparativo entre a atual situação da reciclagem de eletrônicos em nosso país e o potencial de ganhos com esses materiais, tanto em relação a benefícios ambientais, quanto econômicos. Para o comparativo e os cálculos, utilizou-se como base a produção e venda de computadores, informada pela ABINEE, de acordo com o tempo médio de vida útil. Para usuários domésticos, o tempo é em torno de dois a cinco anos, enquanto que para usuários corporativos esse número varia entre dois e quatro anos. Adotou-se, portanto, um tempo médio de quatro anos de vida útil para os equipamentos, em geral.

Ainda, integrando o estudo, está a comparação entre a concentração de terras raras nos imãs e no minério bruto, como forma de estimular mais ações de garimpo urbano e incentivar a reciclagem desse material, para reinserir os metais no ciclo produtivo, sem as degradações decorrentes da mineração.

## 4 Resultados

### 4.1 Caracterização da periculosidade

A análise em EAA do extrato de lixiviação, indicado pela NBR 10005, para determinação se o resíduo é perigoso ou não, apresentou resultado negativo. A concentração dos metais em solução está abaixo dos valores determinados pela norma NBR 10004, configurando, portanto, resíduo não perigoso. Parâmetros como cromo e mercúrio não foram detectados pelo método (ND). Os valores encontrados no ensaio, o limite de detecção do método (LDM) e as concentrações limite indicadas pela norma, constam na tabela 4 abaixo:

Tabela 4: Resultados da análise de EAA.

Parâmetro	Unidade	Amostra		LDM	NBR 10004
		A	B		
Cádmio	mg/L	0,006	0,013	0,006	0,5
Chumbo	mg/L	0,093	0,158	0,042	1
Cromo	mg/L	ND	ND	0,009	5
Prata	mg/L	0,007	0,008	0,007	5
Mercúrio	mg/L	ND	ND	0,000184	0,1

### 4.2 Desmontagem, pesagem e caracterização química

A tabela 5 mostra a composição mássica média das peças de um disco rígido de computadores do tipo desktop. Nota-se que as carcaças são as peças mais representativas, chegando a quase 70% da massa total dos HDs. Já os imãs representam cerca de 3,5% da massa do conjunto total.

Tabela 5: Massa média das peças dos HDs de desktop

Peça	Massa Média (g)	Massa Média (%)	Desvio Padrão (g)	Desvio padrão (%)
Carcaça	368,24	68,96	± 77,12	± 20,94
Discos	23,06	4,32	± 5,36	± 23,24
Braço	17,46	3,27	± 6,35	± 36,37
Motor	40,71	7,62	± 7,40	± 18,18
Bobina	6,22	1,16	± 1,07	± 17,20
Anéis	6,10	1,14	± 1,55	± 25,41
Imã	18,51	3,47	± 8,25	± 44,57
Parafusos	7,27	1,36	± 1,36	± 18,71
PCI	34,90	6,54	± 11,29	± 32,35
Outros	11,50	2,15	± 4,80	± 41,74
HD inteiro	533,97	-	± 88,47	± 16,57

A composição mássica dos HDs de notebook encontra-se na tabela 6. Da mesma forma como ocorre para os discos rígidos de desktop, a carcaça dos HDs de notebook também é a peça mais significativa em termos de massa.

Tabela 6: Massa média das peças dos HDs de notebook

Peça	Massa Média (g)	Massa Média (%)	Desvio Padrão (g)	Desvio padrão (%)
Carcaça + motor	70,27	70,08	± 15,12	± 21,52
Discos	4,87	4,86	± 0,30	± 6,16
Braço	5,48	5,47	± 1,50	± 27,37
Anéis	2,49	2,48	± 1,31	± 52,61
Imã	2,86	2,85	± 0,63	± 22,03
Parafusos	2,06	2,05	± 1,15	± 55,83
PCI	11,14	11,11	± 1,45	± 13,02
Outros	1,10	1,10	± 0,97	± 88,18
HD inteiro	100,27	-	± 26,76	± 26,69

Os valores elevados de desvio padrão nos dois grupos de discos rígidos estão relacionados ao tipo de material empregado na confecção do produto, ao fabricante e ao ano de fabricação, já que a tecnologia se modifica rapidamente.

Ao realizar a análise de FRX, constatou-se que as carcaças são feitas basicamente de dois tipos de ligas metálicas: uma de aço inoxidável e outra de alumínio. A distribuição elementar desse material encontra-se nas figuras 6a e 6b, onde a carcaça do tipo I representa aquelas fabricadas com a liga de aço inox e a

carcaça de tipo II representa as compostas pela liga de alumínio. Dos 25 discos rígidos, encontrou-se a carcaça de tipo I em 9 unidades, enquanto que a de tipo II compõe as outras 16 unidades.

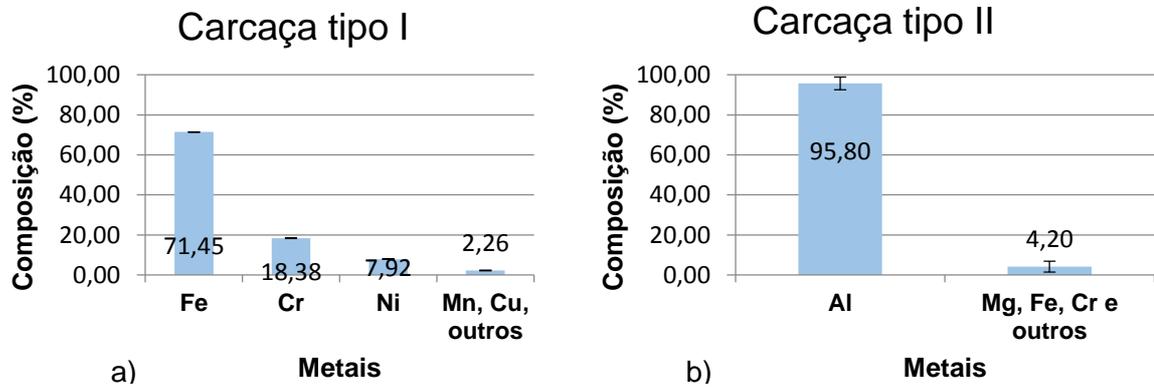


Figura 6: a) carcaça do tipo I – aço inox; b) carcaça do tipo II – alumínio.

Dos 25 HDs, em 23, os discos de gravação encontrados são feitos por uma liga de níquel e fósforo (nominado como Tipo A), conforme a figura 7, enquanto que em outros 2 HDs encontrou-se 2 tipos diferentes de discos de gravação (nominados como Tipo B e Tipo C). Em um deles, representado pela figura 8a, o disco B, é composto por uma liga de silício, zircônio, titânio e alumínio. Já o disco C, cuja composição consta na figura 8b, é feito de uma liga Si-Al, com alguns outros metais em quantidades menores. Ambos discos B e C são oriundos de HDs de notebook.

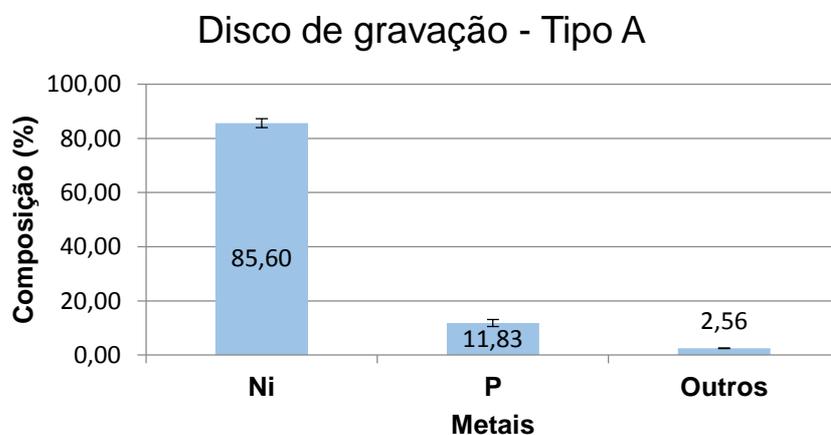


Figura 7: Composição dos discos de gravação.

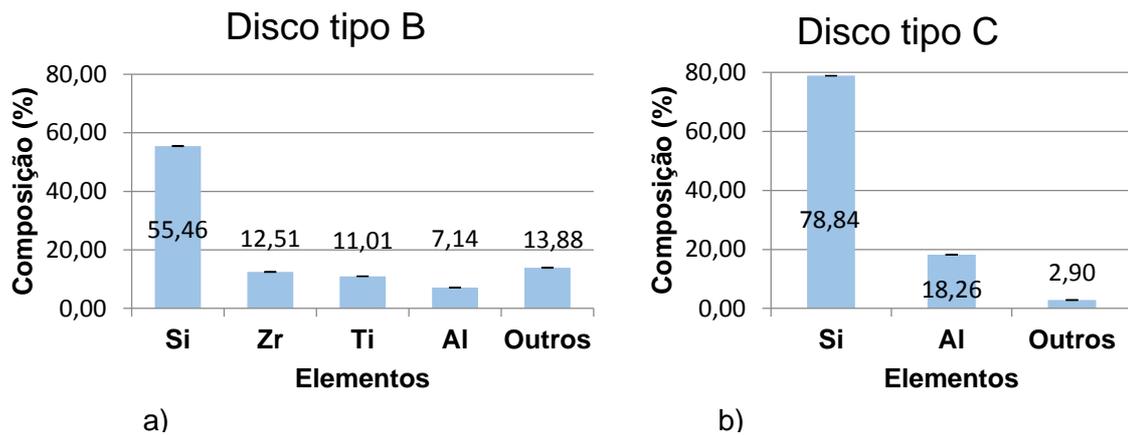


Figura 8: a) Composição do disco de tipo B e b) do disco tipo C.

Outro componente analisado, o braço atuador é constituído por uma liga Fe-Cr-Ni, caracterizando um aço inox austenítico e sua composição percentual pode ser observada na figura 9.

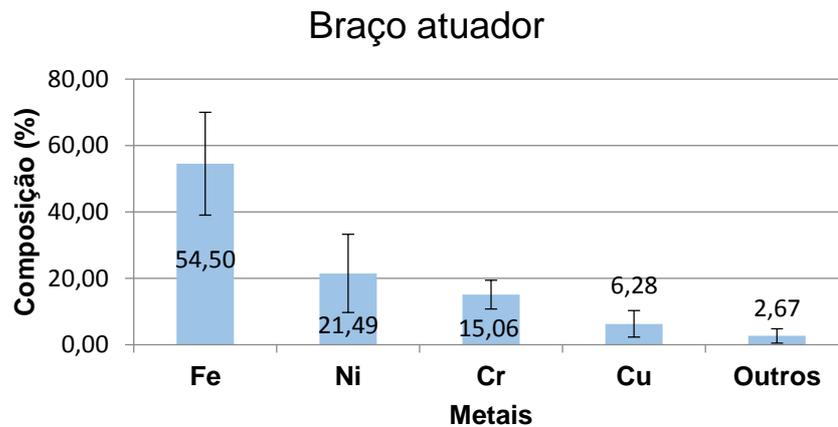


Figura 9: Composição do braço atuador.

Os motores são confeccionados com uma liga de Al-Si, como mostra a figura 10, e foram analisados 2 pontos no lado externo, independente de terem sido completamente desmontados ou não. As bobinas que foram analisadas demonstraram ser feitas por fios de cobre enrolados em um eixo polimérico.

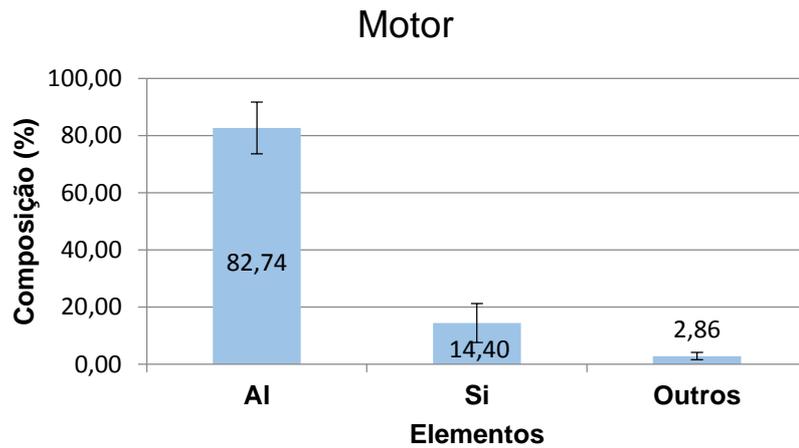


Figura 10: Composição do motor.

Os anéis metálicos que acompanham o motor são basicamente confeccionados com alumínio, como observado na figura 11.

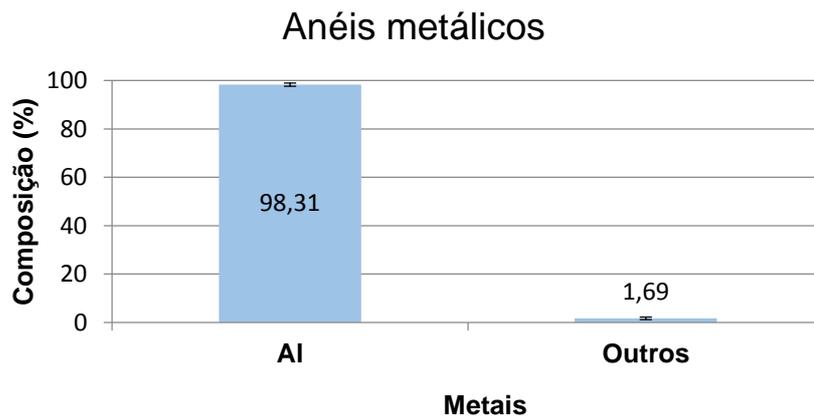


Figura 11: Composição dos anéis metálicos.

Observou-se que temperaturas inferiores a 300 °C não permitem a remoção da camada de níquel do ímã e em tempos menores do que 30 minutos não ocorre a completa desmagnetização do material. Os ímãs permanentes, analisados por EDS, foram divididos em três categorias: ímãs que contêm praseodímio e neodímio (Pr + Nd); ímãs que contêm neodímio, mas não contêm praseodímio (Nd) e ímã de níquel (Ni), como visto nas figuras 12, 13 e 14 respectivamente. Dos 25 discos rígidos utilizados, 15 não contêm praseodímio, 9 contêm ambos Nd e Pr e apenas 1 ímã é feito com uma liga de ferro e níquel. Dos HDs de notebook, apenas 1 contém Nd e Pr, os outros dois são de Nd. Em geral, os ímãs são compostos de uma liga de Nd-Fe-B, a mais usual atualmente. Alguns fabricantes adicionam praseodímio ao ímã

para aumentar a coercividade e diminuir custos, já que o Pr costuma ser mais barato que o Nd e apresenta características físico-químicas muito semelhantes (ANGELO, 2005). O imã composto por Fe-Ni é bem antigo e já não é mais usado atualmente, devido ao desenvolvimento de imãs mais potentes e modernos, feitos com Nd.

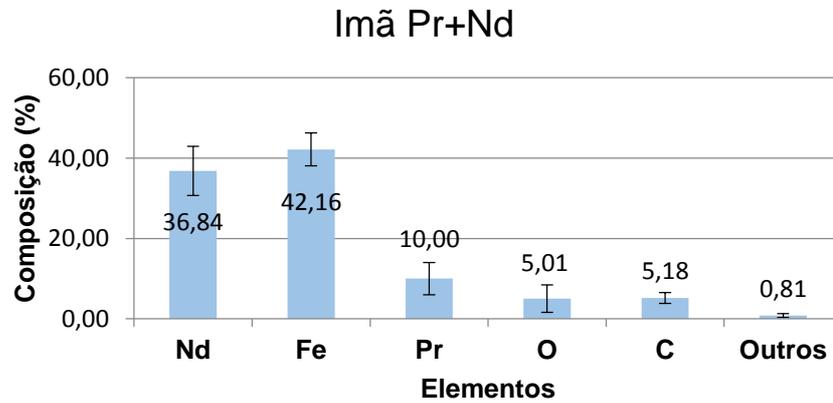


Figura 12: Composição dos imãs com praseodímio e neodímio.

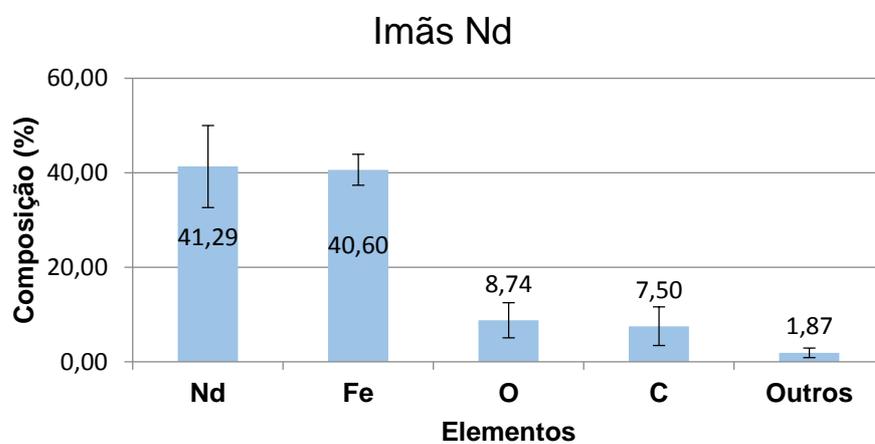


Figura 13: Composição dos imãs contendo neodímio.

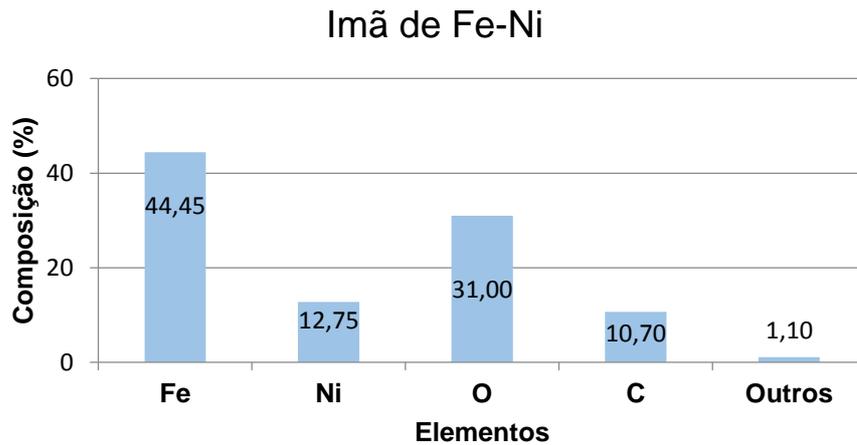


Figura 14: Composição do ímã de Fe-Ni.

Baseando-se na estimativa de vendas de computadores pela ABINEE (2015), no tempo médio de uso de 4 anos, tanto para usuários corporativos quanto domésticos, e utilizando os dados obtidos na caracterização, temos que entre 2007 e 2011, cerca de 64 milhões de computadores foram vendidos e, portanto, já estariam obsoletos atualmente. Cada computador tem um disco rígido, então se levarmos em consideração a distribuição de HDs encontrada nessa pesquisa, de 6 HDs de desktop, para 1 de notebook, desses 64 milhões, aproximadamente 55 milhões são discos rígidos de desktop e 9 milhões são de notebook.

Assim, com uma média mássica de 18,51 g de ímã para aqueles de desktop e de 2,86 g para aqueles de notebook, estima-se que, no período avaliado, foram geradas cerca de 1044 toneladas de ímãs permanentes. Se fizermos o mesmo cálculo para carcaças, teremos uma geração de mais de 31 mil toneladas de sucata de alumínio e quase 7 mil toneladas de sucata de aço inox. Os discos de gravação representam aproximadamente 1312 toneladas de sucata de liga de Ni-P, enquanto que o braço atuador representa 1000 t de liga de Fe-Ni, os anéis respondem por cerca de 358 t de alumínio e os motores a mais de 2239 t de liga Al-Si e 330 t de Cu, considerando a bobina.

Se considerarmos somente o ímã dos HDs, observa-se que a concentração de terras raras nessa peça é muito superior à concentração desses metais na maior mina do mundo, Bayan Obo. No ímã, encontramos cerca de 40 % de neodímio, enquanto na reserva chinesa a concentração é de 6 %. Esse dado é um importante aliado no momento de se pensar em estabelecer uma rota de reciclagem desses

materiais no Brasil. Pode ser uma boa fonte de renda para empresas e/ou governo, visto que a exportação de matéria-prima é muito mais vantajosa economicamente do que o modelo brasileiro atual, de exportar sucata. O preço do neodímio metálico vendido no mundo, por exemplo, é em torno de 87 US\$/kg e o do óxido de neodímio é de 59 US\$/kg (MINERALPRICES, 2015). Além da vantagem financeira, a reciclagem desse metal no Brasil possibilitaria aumentar a oferta de terras raras no mundo, de forma que os outros países não dependessem tanto da regulação imposta pelo monopólio chinês.

Quando avaliamos também a relação da reciclagem de todos ou a maioria dos metais de um HD com a redução de impactos ambientais, o resultado é bastante positivo. A atividade de mineração é responsável por emissões gasosas da ordem de toneladas e de intenso uso de energia. Para a produção de 1 t alumínio, por exemplo, quando a origem é secundária, há uma redução de 96% do consumo de energia. A produção secundária de níquel reduz em 97% o consumo de energia e a de cobre em 87%.

O Brasil já possui tecnologia e companhias responsáveis pela reciclagem de Al, Cu e de aço inox, o que facilita ainda mais a inserção desses materiais oriundos da sucata tecnológica na linha de reciclagem, basta que haja uma logística reversa e um processo de separação eficientes. Porém, para os terras raras ainda não há incentivo e nem empresas que realizem sua reciclagem, só pesquisas para desenvolvimento de tecnologias.

ANGELO (2005) defende o uso de processos de decrepitação por hidrogênio para reciclar os ímãs e fabricar novos produtos magnéticos. O Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), da Universidade de São Paulo (USP), juntamente com o pesquisador Dr. Élio Périgo depositaram em 2011 uma patente referente ao reprocessamento de ímãs de Nd-Fe-B a partir da técnica de HDDR: hidrogenação, desproporção (transformação da fase magneticamente dura em outras fases), dessorção (retirada de hidrogênio da estrutura cristalina do composto previamente hidrogenado) e recombinação (obtenção da fase magneticamente dura com tamanho de grão inferior ao inicial) (IPT, 2015). Essa é uma tecnologia brasileira e que poderia ser implantada e utilizada para o processamento e reciclagem dos ímãs, evitando que esse material se perdesse em aterros ou no exterior.

## 5 Conclusões e considerações finais

A etapa de caracterização da periculosidade demonstrou que os HDs não são resíduos perigosos.

A etapa de desmontagem e pesagem mostrou que a carcaça é a peça mais significativa do HD, em termos de massa, correspondendo a cerca de 70% da massa total do disco rígido.

Foram encontrados dois tipos de carcaça, um tipo feito com uma liga de aço inoxidável e outra liga feita de alumínio. Dos 25 HDs coletados, 9 possuem carcaça de aço inox e 16 possuem carcaça de alumínio.

Em 23 amostras, os discos de gravação são fabricados com uma liga de níquel, enquanto que há também 1 amostra composta por uma liga de Si-Zr-Ti e outra amostra fabricada com uma liga de Si-Al.

O braço atuador é composto por uma liga de aço inoxidável, enquanto o motor é feito com uma liga de Al-Si e os anéis metálicos por uma liga de alumínio.

Os ímãs permanentes encontrados são compostos por Nd e Pr, Nd ou Ni, Todas as ligas que os compõem contém ferro. Em 9 unidades, os ímãs são compostos por uma liga contendo ambos os terras raras. Em 15 unidades, encontrou-se somente o terra rara Nd, enquanto que uma unidade, mais antiga, é fabricada com uma liga contendo Ni e nenhum terra rara.

O Brasil é um grande produtor de REEE, porém ainda não possui práticas bem estabelecidas. A PNRS foi criada para nortear e melhorar a gestão de resíduos sólidos no país, mas enfrenta resistência e dificuldades de ser cumprida. Há problemas na logística reversa, na conscientização popular, na informalidade e no interesse em proporcionar a correta destinação ao resíduo em fim de vida útil.

O país perde porque não tem um sistema de coleta bem definido e uniforme em todas as regiões, fazendo com que uma grande parcela dos REEE seja extraviada ou disposta de forma incorreta, em lixões ou terrenos abandonados; não há incentivo massivo e forte para campanhas de educação ambiental e conscientização em prol da geração e destinação de resíduos especiais. Perde ainda mais quando deixa de gerar empregos formais na coleta e nas cooperativas, haja vista que o mercado informal corresponde a 30% do total. A informalidade no

setor de coleta e separação afeta diretamente a saúde dos trabalhadores que lidam com o resíduo sem qualquer tipo de proteção ou cuidado, não tem acesso a equipamentos específicos que facilitariam a desmontagem ou processamento e acabam ficando expostos a substâncias perigosas ou cancerígenas.

Os prejuízos se mostram ainda mais evidentes sob a ótica econômica. Quando o Brasil exporta sucata ao invés de matéria-prima, está vendendo material com pouco valor agregado. Uma estimativa inicial dos ganhos brutos oriundos da venda de neodímio metálico, caso houvesse reciclagem, indica que eles poderiam chegar a mais de US\$ 7 milhões/ano. Considerando a cotação atual do dólar, R\$ 3,697 em 21/11/2015, a receita bruta seria de mais de R\$ 26 milhões/ano. Se for contabilizado também o montante que pode ser obtido com a venda de Al, Cu e outros, esse valor é ainda maior. É mais do que tempo de a iniciativa pública ou privada dar mais atenção a esse setor, até pelo fato dos impactos ambientais gerados pela reciclagem serem de menor amplitude quando comparada aos impactos oriundos da extração primária.

As oportunidades na área da gestão de resíduos podem ser estendidas também aos demais países da América Latina. Nenhuma outra nação possui tecnologia para processar os REEE na região, logo, seria interessante o Brasil se tornar um polo latino americano de reciclagem desse material. Para incentivar a instalação de companhias especializadas no ramo, o país poderia criar uma política de isenção ou diminuição de impostos a elas e às empresas que realizam a logística reversa e a separação.

Outras ações que facilitariam a correta gestão desses resíduos seriam a inclusão de uma taxa de destinação no preço final do produto, assim como ocorre com a cobrança de tratamento de esgoto na conta de água, e a obrigatoriedade do consumidor de devolver ao fabricante quando o produto chegar ao final da vida útil, por meio de um compromisso formal, termo de garantia ou algo semelhante. Talvez seja uma forma de as pessoas desenvolverem um pouco mais a consciência a respeito do tema e suas problemáticas.

Para que ocorra o processamento e a reciclagem dos REEE é necessário também que haja uma eficiente rota de logística reversa. A viabilidade da reciclagem reside no fato da indústria se estabelecer o mais centralizada possível entre os maiores geradores. Sabe-se que há diversos impostos ao transportar resíduos de um estado pro outro e o país é grande em extensão territorial. A fim de que essas

cobranças não se tornem um ônus e fator impeditivo da gestão de resíduos, o governo pode contribuir de forma a isentar tais impostos, além de criar iniciativas de recolhimento periódico de resíduos, tal qual a prefeitura da cidade de Porto Alegre já faz. O Departamento Municipal de Limpeza Urbana criou pontos de coleta de REEE e a cada período realiza campanhas para aumentar a arrecadação desse material.

## Referências

Brasil. Lei 12.305 Política Nacional de Resíduos Sólidos. 2010.

ABDI - Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos: Análise de Viabilidade Técnica e Econômica. Brasília, 2012.

ABELPRE - Associação Brasileira de Empresas De Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. São Paulo, 2009.

ABINEE - Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. Mercado cinza é o principal desafio da Política de Resíduos Sólidos. Newsletter ABINEE, v. 582, n. 1, p. 1– 1, Abril 2011.

ABINEE - Associação Brasileira de Indústria Elétrica e Eletrônica. Panorama Econômico 2015 e Desempenho Setorial. São Paulo, 2015.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004 Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro/RJ: [s.n.], 2004.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10005 Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro/RJ: [s.n.], 2004.

AHLUWALIA, P. K.; NEMA, A. K. A life cycle based multi-objective optimization model for the management of computer waste. Resources, Conservation and Recycling, v. 2007, n. 51, p. 792 – 826, Fevereiro 2007.

ANGELO, J, D. Estudo das propriedades e microestruturas de ímãs permanentes de terras raras e metais de transição preparados pelo processo de decrepitação hidrogênio. Tese de doutorado - Universidade de São Paulo, 2005.

BARBOZA M. R.; GONÇALVES, R. F. (Ed.). Logística Reversa de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos: Uma Avaliação Comparativa de Instrumentos Regulatórios. São Paulo: 5th International Workshop - Advances in Cleaner Production, 2015.

BINNEMANS, K. et al. Recycling of rare earths: a critical review. *Journal of Cleaner Production*, v. 2013, n. 51, p. 1 – 22. Janeiro, 2013.

CASTOR, S. B.; HEDRICK, J. B. Industrial Minerals & Rocks. In: Sétima. [S.l.]: Society for Mining Metallurgy, 2006. cap. 2, p. 769 – 792.

CHRISTMANN, P. A forward look into rare earth supply and demand: a role for sedimentary phosphate deposits? *Procedia Engineering*, v. 2014, n. 83, p. 19 – 26, 2014.

CUI, J.; FORSSBERG, E. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review. *Journal of Hazardous Materials*, v. 2003, n. B99, p. 243 – 263, Fevereiro 2012.

DEGRI, M. J. J. The Processing and Characterisation of Recycled NdFeB-type Sintered Magnets. Tese (Doutorado) — University of Birmingham, Agosto 2014.

DU, X.; HISCHIER, R.; WÄGER, P. Challenge of Impact assessment for by-product and co-product metal. Suíça, 2014.

EMPA - Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology. e-Waste Definition. Acesso em 15/11/2015. Disponível em <<http://ewasteguide.info/introduction/e-waste>>.

EPA - U.S. Environmental Protection Agency. Rare Earth Elements: A Review of Production, Processing, Recycling, and Associated Environmental Issues. 2012.

FEAM - Fundação Estadual de Meio Ambiente. Diagnóstico da geração de resíduos eletroeletrônicos no Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009.

FRANCO, R. G. F.; LANGE, L. C. Estimativa do fluxo dos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos no município de Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. *Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 16, n. 1, p. 73 – 82, Janeiro/Março 2011.

GOLEV, A. et al. Rare earths supply chains: current status, constraints and opportunities. *Resources Policy*, v. 2014, n. 41, p. 52 – 59, Março 2014.

GROSSI, J.; VALENTE, J. Guia Prático para Cálculo de Recursos e Reservas Minerais. 2003. Acesso em 15/11/2015. Disponível em: <<http://www.geologo.com.br/JORC.ASP>>.

GUPTA, C. K.; KRISHNAMURTHY, N. Extractive metallurgy of rare earths. *International Materials Reviews*, v. 37, n. 5, p. 197 – 248, 1992.

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Pesquisa sobre pagamento por serviços ambientais urbanos para a gestão de resíduos sólidos . Brasília, 2010.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Projeto de reprocessamento de materiais magnéticos aponta caminho para superar gargalo no fornecimento de terras raras. Acesso em 20/11/2015. Disponível em: <[http://www.ipt.br/noticias\\_interna.php?id\\_noticia=430](http://www.ipt.br/noticias_interna.php?id_noticia=430)>.

IUPAC - International Union of Pure and Applied Chemistry. Periodic Table of the Elements. Acesso em 12/10/2015. Disponível em <[http://www.iupac.org/fileadmin/user\\_upload/news/IUPAC\\_Periodic\\_Table-1May13.pdf](http://www.iupac.org/fileadmin/user_upload/news/IUPAC_Periodic_Table-1May13.pdf)>.

KOBAL, A. B.; SANTOS, S. M. dos; SOARES, F. de A. Cadeia de suprimento verde como apoio a sustentabilidade ambiental - os desafios do setor do lixo eletrônico. In: XV Simpósio de Administração da Produção, Logística e Operações Internacionais - SIMPOI. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1 – 17.

KOLTUN, P.; THARUMARAJAH, A. Life Cycle Impact of Rare Earth Elements. ISRN Metallurgy, v. 2014, p. 1 – 10, Maio 2014.

KUNRATH, J. L. Resíduos Eletroeletrônicos: Um Diagnóstico da Cadeia de Processamento. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2015.

LOONEY, R. Recent developments on the rare earth front evidence of a new technocratic mercantilism emerging in China? v. 12, n. 1, p. 47 – 78, World Econ 2011.

MASSARI, S.; RUBERTI, M. Rare earth elements as critical raw materials: focus on international markets and future strategies. Resources Policy, v. 2013, n. 38, p. 36 – 43, Agosto 2012.

MINERALPRICES. Rare earth metals. Acesso em 20/11/2015. Disponível em <<http://mineralprices.com/>>.

MIRANDA, F. C. et al. Gerenciamento de resíduos – uma análise econômica do potencial de reciclagem de computadores, considerando o caso da Universidade Federal Fluminense – UFF. 2013.

PEREZ, G. D. P. O ciclo sustentável do resíduo eletrônico: um estudo do programa de reciclagem de resíduos tecnológicos de Porto Alegre. Dissertação (Monografia) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2011.

PORTO DIGITAL. Ciclo de vida de equipamentos eletroeletrônicos. Recife/PE, 2011.

ROCIO, M. A. R. et al. Terras-raras: situação atual e perspectivas. BNDES Setorial, Rio de Janeiro/RJ, n. 35, p. 369 – 420, Março 2012.

SANTOS, C. A. F. dos; NASCIMENTO, L. F. M.; NEUTZLING, D. M. A gestão dos resíduos de equipamentos eletrônicos (REEE) e as consequências para a

sustentabilidade: as práticas de descarte dos usuários organizacionais. Revista Capital Científico, v. 12, n. 1, p. 1 – 18, Janeiro/março 2014.

SEAMAN, J. Rare earth and clean energy: analyzing China's upper hand. Paris: [s.n.], 2010. Acesso em 15/11/2015. Disponível em: <<https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/noteenergieseaman.pdf>>.

SILVA, L. A. A. da; PIMENTA, H. C. D.; CAMPOS, L. M. de S. Logística reversa dos resíduos eletrônicos do setor de informática: realidade, perspectivas e desafios na cidade do Natal-RN. Revista Produção Online, Florianópolis, v. 13, n. 2, p. 544 – 576, Abril/Junho 2013.

SLOWINSKI, G. Remanufacturing: the emergence of an urban industry. Economic Development Quarterly, v. 12, n. 3, p. 238 – 247, Agosto 1998.

SPRECHER, B.; KLEIJN, R. Recycling Potential of Neodymium: The Case of Computer Hard Disk Drives. Environmental science and technology, v. 2014, n. 48, p. 9506 – 9513, Julho 2014.

STEGEN, K. S. Heavy rare earths, permanent magnets, and renewable energies: An imminent crisis. Energy Policy, v. 2015, n. 79, p. 1 – 8, Janeiro 2015.

UNEP - United Nations Environment Programme. Recycling - From e-waste to resources . [S.l.], 2009.

USGS - U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries. 2015.

VEIT, H. M. et al. Utilização de processos mecânicos e eletroquímicos para reciclagem de cobre de sucatas eletrônicas. REM-Revista Escola de Minas, Ouro Preto/MG, v. 61, n. 2, p. 159 – 164, Abril/Junho 2008.

XAVIER, L. H. et al. Gestão de resíduos eletroeletrônicos: mapeamento da logística reversa de computadores e componentes no Brasil. In: 3º Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1 – 12.

XIE, F. et al. A critical review on solvent extraction of rare earths from aqueous solutions. *Minerals Engineering*, v. 2014, n. 56, p. 10 – 28, Novembro 2013.

ZHANHENG, C. Global rare earth resources and scenarios of future rare earth industry. *Journal of Rare Earths*, v. 29, n. 1, p. 1 – 6, Janeiro 2011.