



DEFININDO RESÍDUO VALIOSO: O PROBLEMA DE DEFINIR MASSA COMO UNIDADE DE MEDIDA DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

RESUMO

O manejo de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEEs) é um desafio mundial devido ao seu volume crescente e seu potencial de poluição ambiental e danos à saúde humana. Além disso, REEEs tem em sua composição materiais críticos e de interesse econômico. Assim, a reciclagem de REEEs é importante tanto em termos econômicos, como ambientais. O sistema de manejo de REEEs hoje utiliza o peso (massa) como unidade única de medida, sem uma categorização rígida, o que traz distorções prejudiciais para o sistema, pois (i) mascara quais componentes estão sendo processados domesticamente e quais estão sendo processados internacionalmente e (ii) faz com que recicladores que precisam atingir metas se dediquem a materiais de maior massa, ao invés de processar materiais tóxicos ou críticos. Uma análise dos componentes exportados para processamento posterior mostra que países como Brasil, Austrália e México atuam como concentradores de materiais valiosos, que exportam esse material depois de os terem coletado e os separado manualmente. Ademais, esse sistema de processamento internacional de resíduo permite que se defina quais são os componentes valiosos presentes nos REEEs: componentes cujo valor intrínseco supera o custo do transporte internacional podem ser considerados valiosos para um determinado país.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos eletroeletrônicos, Fluxo de materiais, Reciclagem de REEE

INTRODUÇÃO

Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE ou *WEEE*, do inglês) são quaisquer equipamentos eletroeletrônicos descartados ou que chegaram ao fim da sua vida útil [1]. Dessa forma, REEE incluem equipamentos de grande demanda como computadores, celulares e televisores, mas também incluem diversos outros como rádios, máquina de lavar louça, forno micro-ondas, secador de cabelos, painéis fotovoltaicos e aparelho de ar condicionado [2]–[4]. Devido ao alto consumo e à vida útil curta, os REEE têm crescido de forma exponencial nos últimos dez anos e essa tendência deve continuar em anos vindouros [5]. Do ponto de vista ambiental, o manejo de REEE é de extrema importância, dado que esses resíduos geralmente possuem substâncias tóxicas em sua composição, que podem danificar o meio ambiente e causar problemas à saúde humana [6], [7]. Ademais, REEE tipicamente possuem materiais valiosos em concentrações superiores àquelas encontradas em seus minérios correspondentes [8]. Assim, a reciclagem dos REEE se faz importante, tanto do ponto de vista ambiental, quanto do ponto de vista econômico. Dentre os benefícios da reciclagem de REEEs, cita-se a recuperação de materiais convencionais (e.g. vidro e alumínio), a recuperação de materiais valiosos ou críticos (e.g. prata, índio, gálio e germânio) [9]–[11], a redução dos gases causadores do efeito estufa [12] e o controle e manejo de metais tóxicos, retardantes de chama bromados e outras substâncias nocivas [13], [14].

A reciclagem de REEEs pode ser dividida em quatro etapas (Figura 1), as etapas iniciais envolvem a desmontagem dos equipamentos ou a cominuição dos mesmos. A etapa seguinte se utiliza da diferença de propriedades físicas para segregar os diferentes materiais, essa etapa inclui processos como o peneiramento, a separação por densidade, a separação magnética, a separação eletroestática, a separação por cor, entre outros. Em seguida, tem-se a terceira etapa que envolve os processos específicos (geralmente químicos) de cada classe de materiais: polímeros, cerâmicos e metais. Se necessário, pode-se implementar uma quarta etapa que envolve o refino dos materiais obtidos na etapa anterior. Os processos podem ser repetidos até que se tenha um material que sirva de matéria prima para a criação de novos produtos [15], [16].

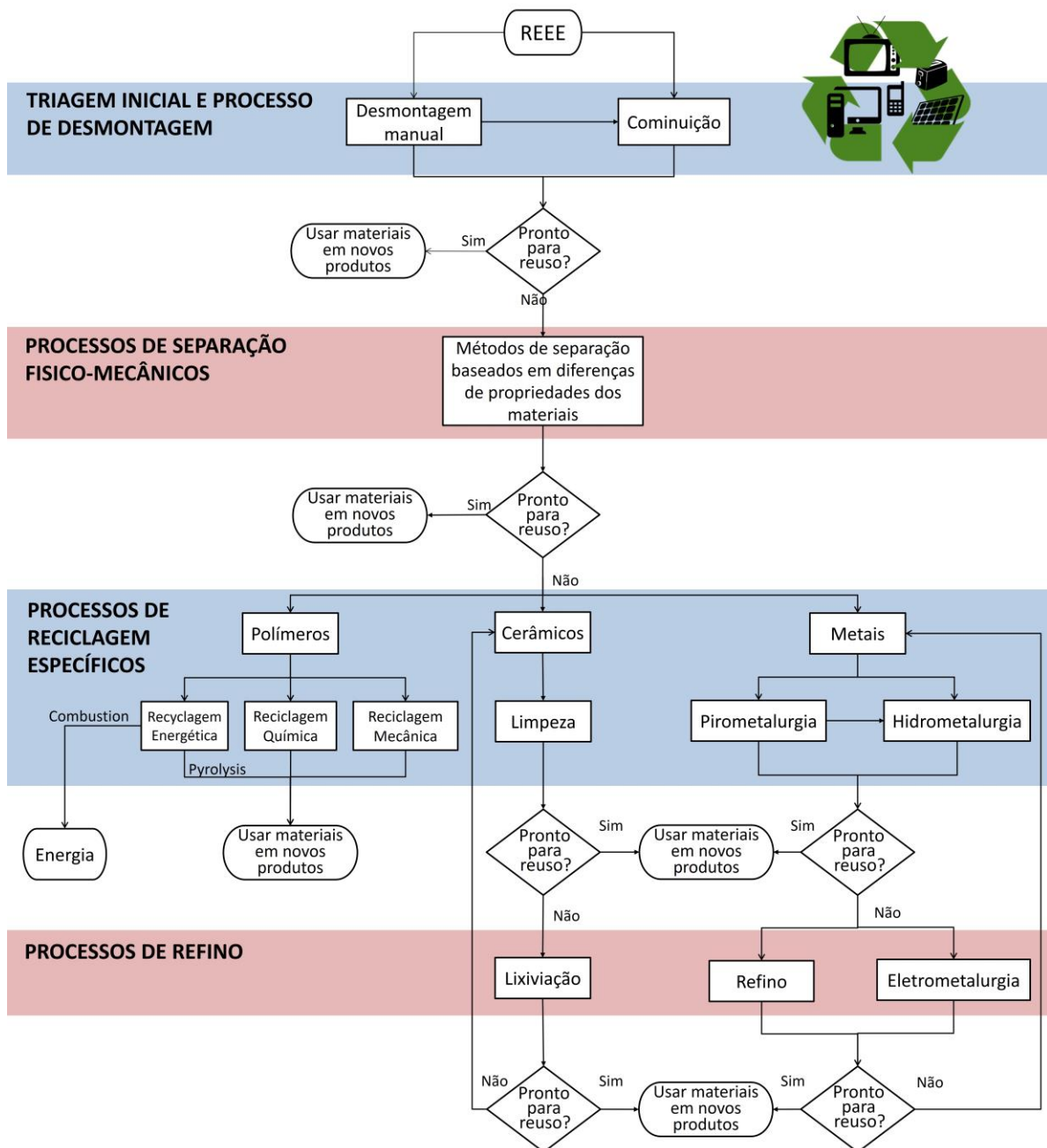


Figura 1: Processos usados na reciclagem de resíduos eletroeletrônicos divididos por etapas[15].

Austrália e Brasil são grandes geradores de REEE, o primeiro registrando 468 toneladas e o segundo registrando 1412 toneladas em 2014 (20,1 e 7 kg per capita, respectivamente) [17]. Ambos possuem dimensões continentais e políticas voltadas ao manejo de REEE que foram implementadas recentemente [18], [19]. Dessa forma, o estudo do sistema de manejo de REEEs destes dois países possibilita uma análise do panorama atual da reciclagem de REEEs e fornece dados de países considerados desenvolvidos (Austrália) e em desenvolvimento (Brasil). Tanto o sistema brasileiro como o australiano foram estudados em publicações recentes e mostram que ambos os países atuam majoritariamente na primeira fase da reciclagem (Figura 1), terceirizando os processos mais avançados para outros países [15], [20]. Torna-se importante, portanto, entender o que está sendo exportado e qual o valor do que é exportado em relação ao que fica no país para ser reciclado de forma doméstica. Os relatórios atuais publicam números de material exportado em termos do peso (massa), tratando todos os componentes já separados como se fossem os REEEs originais [21]–[25]. Este trabalho visa explicar quais as consequências de se usar peso (massa) como forma de mensurar REEEs e como isso pode distorcer o entendimento dos relatórios e estudos divulgados por empresas de reciclagem e órgãos governamentais.



OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho é mostrar que a reciclagem de resíduos eletroeletrônicos atualmente utiliza peso (massa) como unidade de medida principal. Este trabalho também visa discutir os problemas oriundos da utilização dessa unidade de medida e as distorções que isso pode causar. A partir dessa discussão, este trabalho pretende propor uma definição para “materiais valiosos” dentro dos componentes de resíduos eletroeletrônicos.

METODOLOGIA UTILIZADA

A fim de caracterizar o mercado de reciclagem de REEE, visitou-se um total de 21 empresas de reciclagem no Brasil (5), na Austrália (15) e no México (1). Ademais, a fim de obter uma amostragem maior, utilizou-se um questionário eletrônico. O questionário obteve resposta de 58 empresas brasileiras e 28 empresas australianas. Durante as visitas, foram estudados os processos utilizados pelas empresas e o destino dos componentes (“produtos”) depois de processados. O questionário visava obter uma distribuição dos componentes (“produtos”) gerados a partir dos processos de reciclagem das empresas e revelar como as empresas mensuram seus produtos depois de processados. Tanto as visitas quanto o questionário se limitaram a televisores, monitores (tela plana e CRT – tubo de raios catódicos) e computadores. A partir das informações obtidas, foram comparados os dados com estudos anteriores e com informações do banco de dados dos respectivos governos e/ou agentes encarregados do sistema de coleta e tratamento de resíduo nos países.

RESULTADOS OBTIDOS

A visita às empresas e os questionários revelam que todas as empresas atuam no processo de manufatura reversa, ou seja, desmontam os equipamentos eletroeletrônicos a fim de separar seus diversos componentes. Esses componentes são então enviados para diferentes empresas que irão dar continuidade ao processo de reciclagem. Dessa forma, as empresas de reciclagem que tem o primeiro contato com os REEE atuam apenas na primeira fase da reciclagem. A partir dos questionários, foi possível gerar a Tabela 1, que relaciona os principais componentes separados nas recicladoras (separados em pelo menos 80% das empresas contatadas). Nenhuma das 21 empresas visitadas possui algum tipo de processamento avançado (terceira etapa da Figura 1).

Tabela 1: Relação entre equipamento e os principais componentes separados em empresas de reciclagem de REEE.

REEE	Componentes
Computadores	Memória
Computadores	Processador
Computadores	Alumínio
Computadores, monitores, televisores	Cobre
Computadores	Bateria
Computadores, monitores, televisores	Cabos
Computadores, monitores, televisores	Placa de circuito impresso (PCI/PCB)
Computadores	Disco rígido (HDD)
Computadores	Driver de CD
Computadores, monitores, televisores	Polímeros (plásticos)
Computadores	Outros metais diversos
Monitores e televisores CRT	Tubo de raios catódicos
Monitores e televisores de tela plana	Tela de cristal líquido (LCD)

A grande maioria dos componentes é mensurada a partir do seu peso (massa), mas há empresas que utilizam volume, unidade ou ainda outro critério (Tabela 2).



Tabela 2: Unidade utilizada para mensurar componentes separados dos REEE.

Componentes	Percentual de empresas que utilizam			
	Peso (massa)	Unidade	Volume	Outro
CRT	71%	26%	0%	2%
PCI	98%	1%	0%	1%
Cabos	96%	4%	0%	0%
Polímeros	95%	0%	2%	2%
Cobre	100%	0%	0%	0%
Metais	100%	0%	0%	0%
Baterias	89%	7%	1%	2%
Disco rígido (HDDs)	90%	8%	0%	2%
Componentes menores	98%	0%	0%	2%

A Tabela 2 revela que a grande maioria das empresas consultadas utiliza a massa como forma de mensurar os componentes separados dos REEE. Os CRTs, as baterias e os discos rígidos (HDDs) também são mensurados como unidades em uma minoria das empresas contatadas. Os polímeros (plásticos) são os únicos componentes mensurados pelo seu volume, mas isso também acontece apenas em uma minoria de empresas (2%). As visitas também revelaram quais componentes são tipicamente exportados e quais componentes tendem a ser processados de forma doméstica (Tabela 3).

Tabela 3: Relação entre componentes e seu destino para processamento posterior.

Componente	Doméstico	Internacional
Cobre	X	
Alumínio	X	
Componentes feitos majoritariamente de aço	X	
Placa de circuito impresso		X
Disco rígido (HDDs)		X
Memórias		X
Processadores		X
Cabos	X	X
Polímeros	X	X
Baterias	X	X

Os componentes de composição mais simples (majoritariamente de cobre, aço ou alumínio) são tipicamente processados de forma doméstica, enquanto os mais complexos (PCI, HDDs, memórias, processadores) são geralmente exportados para serem processados. Os cabos, baterias e polímeros (plásticos) podem ser processados domesticamente ou internacionalmente de acordo com o preço das *commodities* no mercado interno e externo, do custo do processamento interno e externo e da presença ou ausência de empresas capazes de realizar a reciclagem posterior e de indústria manufatureira capaz de absorver os materiais processados domesticamente. As baterias, no entanto, seguem a premissa da complexidade de processamento: se simples, como as baterias de chumbo-ácido, tendem a ser processadas domesticamente, as de reciclagem mais complexa, como as de níquel-cádmio e as de íon lítio, tendem a ser processadas internacionalmente.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos nessa pesquisa revelam que, nos três países investigados, a reciclagem de REEE começa pelo desmontagem manual (manufatura reversa), onde os equipamentos são separados em diversos componentes. Estes componentes, na sua maioria, precisam de outras etapas de processamento para que virem matéria prima. Estas etapas são geralmente feitas por empresas diferentes das responsáveis pela coleta e desmontagem, e podem ser realizadas no mesmo país (processamento doméstico) ou no exterior



(processamento internacional). A Austrália, através das empresas que administram a reciclagem de REEE e do governo federal, possui controle sobre a quantidade de material oriundo de resíduo eletroeletrônico que é exportado. Esse número chega a 46% em massa de todo REEE coletado (considerando apenas computadores, televisores e monitores) [22]. Entretanto, esse valor não reflete o conteúdo específico de componentes exportados. Ao considerar os REEE como um resíduo único e mensurar todos os componentes pelo seu peso, cria-se uma distorção de informação: os 54% (em massa) restantes que ficam no país são componentes de menor valor agregado ou sem valor nenhum, enquanto os 46% exportados incluem os materiais de maior valor agregado. A partir dos resultados obtidos, observa-se que os componentes que contém os metais de maior valor são todos exportados para serem processados no exterior. Dentre estes componentes estão os processadores e os discos rígidos, que possuem em sua composição, entre outros materiais, ouro, prata e terras raras [26], [27].

Outro problema que surge quando se usa o peso (massa) como unidade única de medida de REEE é a distorção do processo de reciclagem em si. Em países onde há metas de reciclagem em massa (e.g. 50% dos REEE produzidos/importados tem que ser reciclados), as empresas priorizam equipamentos que possuem maior valor agregado e/ou pesados, deixando muitas vezes de lado equipamentos tóxicos, cujo processamento é mais caro, traz menos receita, mas tem grande importância ambiental. Na Austrália, por exemplo, os principais equipamentos reciclados são monitores CRT, monitores de tela plana e computadores: o primeiro por ser mais pesado e os outros dois pelo seu valor agregado. Dessa forma, equipamentos inclusos na mesma meta, como impressoras e periféricos (*mouses*, teclados, *webcams*, etc.), não são reciclados (vão direto para aterro de resíduos) ou são exportados sem separação (ou com separação limitada) de componentes, porque tem pouca massa e pouco valor agregado. Mesmo os equipamentos reciclados podem sofrer distorções dentro da lógica do peso: nos CRTs, por exemplo, o material de maior interesse acaba sendo o vidro e os polímeros, pois representam 60% e 20% em massa do CRT, respectivamente [28]. No entanto, substâncias tóxicas, como o pó fluorescente presente nos CRTs, ficam em segundo plano e muitas vezes são enviadas para aterros.

A análise desse comportamento de mercado pode ser usada para definir quais são os componentes valiosos nos REEEs: componentes cujo valor intrínseco é suficiente para justificar seu envio para o mercado internacional são componentes valiosos. Esse critério, contudo, varia de acordo com o mercado, pois o valor dos componentes/*commodities* varia com o tempo. Os materiais poliméricos e cabos (constituídos principalmente de cobre e policloreto de vinila - PVC) são um exemplo dessa influência de mercado nos componentes, porque eles passaram a ser exportados num segundo momento no mercado australiano. Essa definição também é dependente do volume de material disponível. Para diminuir essa dependência, pode-se considerar o maior container de transporte disponível atualmente e sua capacidade máxima. Dessa forma, mesmo com um volume maior de material, o preço do transporte é quantizado e estabelece-se um limite para tal – o preço do transporte do container. A dependência diminui, mas não é eliminada, considerando que o preço do transporte varia ao longo do tempo de acordo com leis de mercado.

Finalmente, a visita às empresas dos três países revela que estes países atualmente desperdiçam um resíduo valioso, que poderia ser processado de forma doméstica e vendido com alto valor agregado. Os componentes separados que são exportados atualmente concentram materiais de alto valor econômico. Dessa forma, Brasil, Austrália e México atuam como concentradores de materiais valiosos, mas não usufruem do seu valor econômico máximo. Ou seja, arcam com os custos operacionais da coleta de REEE em países de dimensões continentais, arcam com os custos da primeira etapa de reciclagem, mas exportam o material antes do processamento avançado.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Todas as empresas visitadas nos três países atuam como concentradores de componentes valiosos e administram o destino dos componentes separados. Os resultados deste trabalho mostram que as empresas destes países mensuram virtualmente todos os REEEs a partir do seu peso (massa). O peso como unidade única de medida cria distorções sobre a realidade do material que é separado e posteriormente enviado para os processos mais avançados de reciclagem. Componentes de maior valor agregado são exportados para serem processados internacionalmente, enquanto componentes que requerem pouco ou nenhum processamento tendem a serem processados de forma doméstica. Dessa forma, a definição de quais componentes são valiosos dentro da reciclagem de REEEs pode ser determinada a partir das regras de mercado vigentes: componentes cujo valor agregado (valor intrínseco de materiais) é alto o suficiente para justificar o custo do transporte internacional são componentes valiosos, enquanto os que permanecem no país são componentes pouco valiosos. Essa definição varia com o tempo e de país para país. O uso do peso como unidade única de medida também pode ser prejudicial quando se implementa programas de reciclagem com metas, mas sem a definição do que deve ser recuperado no processo. No caso do Brasil, já existem políticas públicas visando a reciclagem de REEEs, mas ainda não foram implementadas metas. O país pode basear-se na falha de outros sistemas de



reciclagem para, quando implementar suas próprias metas, implementar metas que considerem outras características dos resíduos além da massa (e.g. periculosidade, materiais presentes, quantidade no país).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. A. CHAGNES. *WEEE recycling: research, development, and policies*, 1st edition. Waltham, MA: Elsevier, 2016.
2. D. SINHA-KHETRIWAL, P. KRAEUCHI, AND M. SCHWANINGER. *A comparison of electronic waste recycling in Switzerland and in India*. *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 25, no. 5, pp. 492–504, Jul. 2005.
3. EU DIRECTIVE. *Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment, WEEE*. *Official Journal of the European Union L*, vol. 197, pp. 38–71, 2012.
4. B. H. ROBINSON. *E-waste: An assessment of global production and environmental impacts*. *Science of The Total Environment*, vol. 408, no. 2, pp. 183–191, Dec. 2009.
5. C. BALDE ET AL. *E-waste statistics: Guidelines on classifications, reporting and indicators*. United Nations University, IAS-SCYCLE, Bonn, Germany, 2015.
6. R. RAJARAO, V. SAHAJWALLA, R. CAYUMIL, M. PARK, AND R. KHANNA. *Novel Approach for Processing Hazardous Electronic Waste*. *Procedia Environmental Sciences*, vol. 21, pp. 33–41, 2014.
7. R. WIDMER, H. OSWALD-KRAPF, D. SINHA-KHETRIWAL, M. SCHNELLMANN, AND H. BÖNI. *Global perspectives on e-waste*. *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 25, no. 5, pp. 436–458, Jul. 2005.
8. R. CAYUMIL, R. KHANNA, R. RAJARAO, P. S. MUKHERJEE, AND V. SAHAJWALLA. *Concentration of precious metals during their recovery from electronic waste*. *Waste Management*, vol. 57, pp. 121–130, Nov. 2016.
9. P. DIAS, S. JAVIMCZIK, M. BENEVIT, H. VEIT, AND A. M. BERNARDES. *Recycling WEEE: Extraction and concentration of silver from waste crystalline silicon photovoltaic modules*. *Waste Management*, vol. 57, pp. 220–225, Mar. 2016.
10. EUROPEAN COMMISSION. *Environment - Waste -WEEE - Study on photovoltaic panels supplementing the impact assessment for a recast of the weee directive*. 2011.
11. R. JUJUN, Q. YIMING, AND X. ZHENMING. *Environment-friendly technology for recovering nonferrous metals from e-waste: Eddy current separation*. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 87, pp. 109–116, Jun. 2014.
12. A.-S. FOELSTER ET AL. *Electronics recycling as an energy efficiency measure – a Life Cycle Assessment (LCA) study on refrigerator recycling in Brazil*. *Journal of Cleaner Production*, vol. 129, pp. 30–42, Aug. 2016.
13. P. KIDDEE, R. NAIDU, AND M. H. WONG. *Electronic waste management approaches: An overview*. *Waste Management*, vol. 33, no. 5, pp. 1237–1250, May 2013.
14. R. WANG AND Z. XU. *Recycling of non-metallic fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE): A review*. *Waste Management*, vol. 34, no. 8, pp. 1455–1469, Aug. 2014.
15. P. DIAS, A. MACHADO, N. HUDA, AND A. M. BERNARDES. *Waste electric and electronic equipment (WEEE) management: A study on the Brazilian recycling routes*. *Journal of Cleaner Production*, vol. 174, pp. 7–16, Feb. 2018.
16. V. GOODSHIP AND A. STEVELS. *Waste electrical and electronic equipment (WEEE) handbook*. Elsevier, 2012.
17. STEP. *One Global Definition of E-waste*. 2014.
18. BRASIL. *Política Nacional de Resíduos (PNRS) Lei n. 12.305 Câmara dos Deputados, Edições Câmara*. 2. ed. 73 p. 2002.” 2010.
19. DEPARTMENT OF THE ENVIRONMENT AND ENERGY. *National Television and Computer Recycling Scheme - Australian Government*. 2015.
20. BRUCE EDWARDS AND DECLAN O’CONNOR-COX. *The Australian National Television and Computer Recycling Scheme, Case study prepared for the OECD*. 2014.
21. ANZRP. *Annual Report - 2015 - 2016*. 2016.
22. DEPARTMENT OF THE ENVIRONMENT AND ENERGY. *National Television and Computer Recycling Scheme Outcomes 2014-2015 - Australian Government*. 2016.
23. ECYCLE SOLUTIONS. *Annual Report - 2015 - 2016*. 2016.
24. EPSA. *Annual Report - 2015 - 2016*. 2016.



25. MRI PSO. *Annual Report - 2015 - 2016*. 2016.
26. C. A. KOHL AND L. P. GOMES. *Physical and chemical characterization and recycling potential of desktop computer waste, without screen. Journal of Cleaner Production*, Feb. 2018.
27. D. D. MÜNCHEN AND H. M. VEIT, *Neodymium as the main feature of permanent magnets from hard disk drives (HDDs). Waste Management*, vol. 61, pp. 372–376, Mar. 2017.
28. P. DIAS, E. DE OLIVEIRA, AND H. M. VEIT. *Lead hazard evaluation for cathode ray tube monitors in Brazil. Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol. 34, no. 04, pp. 39–45, 2018.