

Impactos e benefícios ambientais do gerenciamento de resíduos eletroeletrônicos

Tiago Barreto Rocha¹

Carmenlucia Santos Giordano Penteadó¹

Resumo

A crescente produção e uso de equipamentos eletroeletrônicos tem resultado no aumento da geração de resíduos provenientes destes equipamentos descartados em todo o mundo. Os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) possuem diversas substâncias perigosas como o chumbo e outros metais pesados, e quando destinados a aterros, ecopontos e mesmo cooperativas de reciclagem sem o devido controle, podem causar diversos impactos ao meio ambiente e à saúde humana. Visando reduzir tais impactos, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) reúne um conjunto de princípios e ações visando à gestão integrada e o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos, incluindo a obrigatoriedade da logística reversa para os REEE. A logística reversa representa uma alternativa de gerenciamento para redução do impacto ambiental causado pela disposição incorreta dos REEE, bem como para valorização dos resíduos por meio da reciclagem. No entanto, para avaliar a sustentabilidade desta alternativa de gerenciamento, é preciso verificar se os benefícios superam os impactos da reciclagem. Diante deste contexto, a Avaliação de Ciclo de Vida tem se consolidado como uma técnica capaz de quantificar os impactos ambientais potenciais de produtos ou sistemas, incluindo os sistemas de gerenciamento de resíduos. O objetivo deste estudo foi avaliar os potenciais impactos e benefícios ambientais do gerenciamento de REEE. A unidade funcional adotada foi o gerenciamento de 1t de REEE. Os processos de coleta, transporte, manufatura reversa (desmontagem), reciclagem mecânica dos materiais e disposição final fizeram parte do sistema de gerenciamento avaliado. Os dados para o inventário dos processos de gerenciamento foram obtidos na literatura internacional e banco de dados adaptando-se, na medida do possível, para a realidade brasileira. A avaliação do impacto do ciclo de vida foi conduzida utilizando-se o método CML2001 para as categorias depleção de recursos abióticos, mudanças climáticas, depleção da camada de ozônio, eutrofização, acidificação e oxidação fotoquímica e o método USEtox para as categorias de toxicidade e ecotoxicidade. Os cálculos e a modelagem foram realizados no

¹ Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia/Programa de Pós Graduação em Tecnologia / tiagobarretorocho@gmail.com / carmenlucia@ft.unicamp.br

software Simapro 8. Os resultados demonstram que o sistema de gerenciamento avaliado apresenta benefícios ambientais para quase todas as categorias de impacto avaliadas, com exceção das categorias de toxicidade humana.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida. Logística Reversa. Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos.

Introdução

Nos últimos anos os equipamentos eletroeletrônicos têm revolucionado o estilo de vida das pessoas, tornando-se indispensáveis em todos os segmentos da sociedade. Entretanto, o crescimento vertiginoso na demanda e produção destes equipamentos tem causado diversos impactos ambientais durante sua produção, uso e descarte.

De acordo com dados da United Nations University (BALDÉ et. al., 2014), são gerados aproximadamente 42 milhões de toneladas de Resíduos eletroeletrônicos (REEE) anualmente. Somente no Brasil, estima-se que em 2015 foram geradas aproximadamente 1 milhão de toneladas de REEE (ABDI, 2013). O problema é que além do volume, os resíduos eletroeletrônicos possuem diversas substâncias perigosas como o chumbo e outros metais pesados (SEPÚLVEDA et al., 2010).

O descarte incorreto de REEE, em lixões ou aterros não controlados, promove a lixiviação de substâncias perigosas como os metais pesados, causando diversos impactos ao meio ambiente e à saúde humana (SONG; LI, 2015). Evitar o aumento desse passivo em todo o mundo tem sido a principal motivação para elaboração de legislações que visam reduzir o teor das substâncias perigosas presentes nos REEE, bem como viabilizar sua reciclagem e dar-lhes correta destinação ao final de sua vida útil. Como exemplo, podem ser citadas as diretivas europeias WEEE (*waste electrical and electronic equipment*) (EUROPEAN UNION, 2002a) e RoHS (*Restriction of Hazardous*

Substances) (EUROPEAN UNION, 2002b), que são referências mundiais.

Seguindo essa tendência, o Brasil instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) através da Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010). A PNRS reúne o conjunto de princípios, instrumentos, diretrizes, metas e ações visando à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos, incluindo a obrigatoriedade da logística reversa para os resíduos eletroeletrônicos.

Para que a logística reversa cumpra o seu papel econômico e ambiental, torna-se necessário avaliar de forma holística a viabilidade econômica e os benefícios ambientais em contraposição aos impactos causados pelas ações de coleta, transporte e restituição dos resíduos ao setor industrial (reciclagem).

Nesse contexto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tem se consolidado como uma ferramenta capaz de quantificar os impactos ambientais potenciais de produtos ou sistemas. Aplicada somente a etapa de logística reversa, a ACV pode auxiliar na quantificação dos fluxos ambientais necessários para coleta, manufatura reversa e reciclagem de REEE, bem como estimar os créditos associados à recuperação de materiais que retornam ao ciclo produtivo.

Hischier et al. (2005) introduziram um questionamento: “Do ponto de vista ambiental: faz sentido reciclar resíduos eletroeletrônicos?”. Partindo deste questionamento os autores utilizaram ACV para demonstrar que, no sistema de logística reversa da Suíça, a reciclagem de REEE apresentava enorme vantagem ambiental em relação à incineração. Wäger et. al. (2011), utilizando-se da mesma metodologia e com dados mais atualizados, concluíram que os impactos da reciclagem dos REEE diminuíram em relação aos resultados apresentados em 2005, tornando a alternativa de reciclagem ainda mais benéfica em comparação à incineração ou aterro.

Song et al. (2013) conduziram um estudo de ACV para avaliar os impactos e os benefícios ambientais do sistema de tratamento de REEE na China. Os resultados demonstram que o maior benefício da reciclagem está na recuperação de metais, seguido da recuperação de plástico, isso porque o

processo de reciclagem evita ou reduz a produção primária dos materiais recuperados. Os autores concluíram, portanto, que o processo de reciclagem é benéfico em comparação aos impactos causados pelo próprio processo. Os autores ainda concluíram que a ACV é uma técnica viável para medir o impacto potencial do tratamento de REEE e também pode ser utilizada para comparar o desempenho entre recicladoras.

Diante do exposto, percebe-se que a ACV pode ser utilizada de diversas formas para o suporte ao gerenciamento de resíduos eletroeletrônicos, sendo uma importante ferramenta no auxílio à tomada de decisão.

O objetivo deste estudo foi avaliar os potenciais impactos e benefícios ambientais decorrentes do gerenciamento de resíduos eletroeletrônicos.

Metodologia

O escopo do estudo perfaz um sistema de gerenciamento que inclui as etapas de coleta, manufatura reversa, reciclagem e inserção do material recuperado em outros ciclos produtivos. Considera-se como função o gerenciamento adequado de REEE. A unidade funcional refere-se ao gerenciamento de 1 tonelada de REEE.

Sistema de gerenciamento

No Brasil, os recicladores de REEE são também conhecidos por agentes de manufatura reversa ou destinadores. Essa denominação deve-se ao fato de tais empreendimentos serem responsáveis, na maioria dos casos, apenas pela segregação (manual ou manual/mecânica) de materiais, partes e peças que compõem o resíduo. Posteriormente, os materiais potencialmente recicláveis (plástico, metais etc.) são enviados para recicladores especializados, que reinserem os materiais no ciclo produtivo.

Cabe ressaltar que existem diferentes abordagens para contabilidade ou

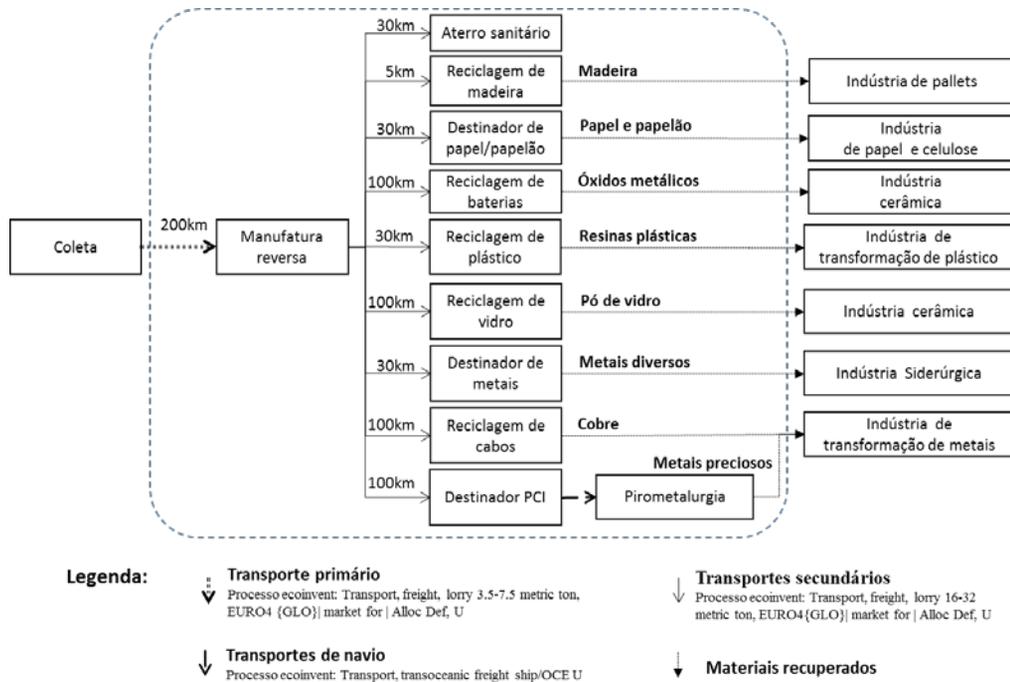
modelagem de sistemas de reciclagem (NICHOLSON et al., 2009). Neste estudo, optou-se por uma abordagem de substituição, em que o material reciclado substitui o material de origem primária, devido ao sistema de reciclagem recuperar e reinserir os materiais reciclados em outro sistema de produto com as mesmas características do material primário. A figura 1 apresenta o sistema de gerenciamento considerado neste estudo.

Inventário, suposições e limitações

Os dados utilizados no sistema modelado foram coletados em uma empresa de manufatura reversa, obtidos de literatura e na base de dados ecoinvent. Assumiu-se a distância de 200 km da coleta dos REEE até a empresa de manufatura reversa (transporte primário), distância estimada conforme raio de atuação da empresa. Para o transporte secundário utilizou-se uma distância média, estimada pela empresa de manufatura reversa, conforme apresentado na figura 1. O quadro 1 mostra os dados coletados na empresa de manufatura reversa e as considerações adotadas para modelagem do sistema.

Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

Para determinar o impacto ambiental potencial do sistema avaliado, foi utilizado o método CML2001 (baseline) para as categorias depleção de recursos abióticos (DRA), depleção recursos abióticos combustíveis fósseis (DRA-f) mudanças climáticas (GWP), depleção da camada de ozônio (DCO), eutrofização (EU), acidificação (AC) e oxidação fotoquímica (OF) e o método USEtox (consensus only) para as categorias de toxicidade humana câncer (TH-c), toxicidade humana não câncer (TH-nc) e ecotoxicidade (EC). Os cálculos e modelagem foram realizados com auxílio do software Simapro 8.

Figura 1. Representação do sistema de gerenciamento de REEE

Quadro 1. Informações coletadas e considerações adotadas, para o fluxo de 1t de REEE

Informações coletadas		Considerações adotadas na modelagem do sistema			
Processo	Quant.(t)	Material ou processo	Produtos evitados	Quant.(t)	Fonte de dados e adaptações
Reciclagem de baterias	1,19E-02	Disposal, Li-ions batteries, pyrometallurgical/GLO U (adaptado com eletricidade Brasil)	Aluminium oxide ¹	9,55E-03	Processo da base ecoinvent incluindo colorífico para indústria cerâmica como produto evitado, conforme (CAVALCANTE et al., 2009)
Reciclagem de plásticos	3,61E-01	Mixed plastics (waste treatment) recycling of mixed plastics ¹	ABS	1,45E-01	Processo ecoinvent, substituindo os produtos evitados conforme (SCHLUMMER et al., 2007)
			PC	4,70E-02	
			HIPS	1,05E-01	
			PP	6,51E-02	
Reciclagem de metais	1,10E-01	Apenas destinação	Pig iron ¹	1,10E-01	Trata-se de um processo direto de destinação para indústria siderúrgica, incluindo ferro como metal evitado conforme (HISCHIER et.al, 2005)
Reciclagem de cabos	1,07E-01	Disposal, treatment of cables/GLO U	Copper gold-silver-zinc-lead-copper mine operation and refining ³	7,09E-02	Processo ecoinvent, incluindo o cobre como produto evitado.
Reciclagem de vidro	9,66E-03	Disposal, treatment of CRT glass/GLO (adaptado com eletricidade Brasil)	Frit, for ceramic tile ¹	9,66E-03	Processo da base ecoinvent incluindo a fritas como produto evitado conforme (SCHABBACH et al., 2011)

(Continua)

Quadro 1 (conclusão)

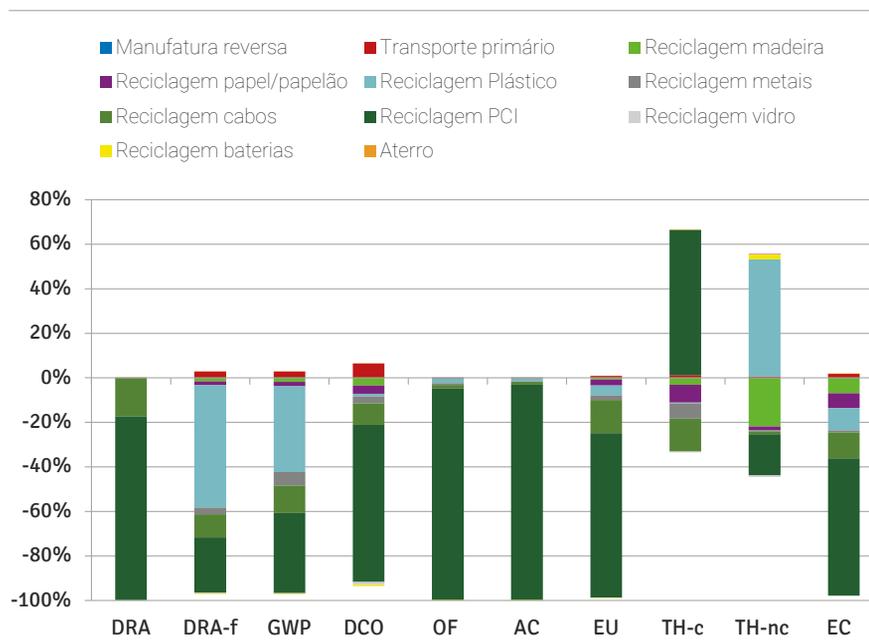
Reciclagem de placas	2,14E-01	Electronics scrap treatment of, metals recovery in copper smelter ²	Lead gold-silver-zinc-lead-copper mine operation and refining ¹	1,24E-03	Processo ecoinvent incluindo a recuperação de metais que retornam ao ciclo produtivo conforme (CLASSEN et al., 2009)
			Nickel, 99.5% nickel mine operation, sulfidic ore ¹	7,13E-03	
			Copper gold-silver-zinc-lead-copper mine operation and refining ²	5,07E-02	
			Palladium platinum group metal mine operation, ore with high content ⁴	6,62E-05	
			Silver gold-silver-zinc-lead-copper mine operation and refining ²	1,20E-03	
			Gold gold-silver-zinc-lead-copper mine operation and refining ²	3,64E-05	
			Aluminium, primary, ingot ¹	1,94E-02	
Reciclagem de madeira	6,28E-02	Apenas destinação	Sawnwood, parana pine from sustainable forest management, kiln dried {BR} sawing and planing, parana pine, kiln dried Alloc Def, U	6,28E-02	Trata-se de um processo direto de destinação para fabricação de pallets incluindo madeira como produto evitado
Reciclagem de papel	1,22E-01	Paper (waste treatment) recycling of paper ¹	Sulfate pulp ¹	1,22E-01	Processo ecoinvent
Disposição final	7,40E-04	Disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/CH U	Não se aplica	7,40E-04	Processo ecoinvent

¹ {GLO} | market for | Alloc Def, U ² {SE} | market for | Alloc Def, U ³ {ROW} | market for | Alloc Def, U ⁴ {RU} | market for | Alloc Def, U

Resultados e Discussões

Os resultados apontam que o gerenciamento de REEE por meio da logística reversa apresenta benefícios ambientais para a maioria das categorias de impacto ambiental, com exceção das categorias de toxicidade humana. A figura 2 apresenta os impactos e benefícios ambientais, por categoria de impacto.

Figura 2. Benefícios e impactos ambientais, por categoria de impacto, para o gerenciamento de REEE



A reciclagem das placas de circuito impresso (PCI), apesar de representar apenas 21% (em massa) do material reciclado dos REEE, apresenta os maiores benefícios ambientais em quase todas as categorias de impacto, com exceção da categoria TH-c. Entre os benefícios ambientais, destaca-se o potencial

para redução do dano ambiental pela extração de metais preciosos (ouro, prata e paládio) e cobre. Por outro lado, a queima das PCIs no processo pirometalúrgico revela emissões de dioxinas com potencial para causar danos à saúde humana (câncer). No processo pirometalúrgico, as PCIs, compostas basicamente de metais e compostos orgânicos, são fundidas em altas temperaturas, produzindo uma mistura de diversos metais que na sequência são recuperados e refinados. Nesse processo, os compostos orgânicos sofrem combustão incompleta gerando dioxinas (CLASSEN et al., 2009).

Dentre as tecnologias alternativas ao processo pirometalúrgico, merecem destaque os processos hidrometalúrgico e biohidrometalúrgico, que envolvem o uso de reagentes químicos e bactérias, respectivamente, para lixiviação dos metais nas PCIs (CUI; ZHANG, 2008). Ambos os processos surgem como promessas potencialmente menos impactantes que a pirometalurgia.

O processo de reciclagem de plástico se destaca por apresentar os maiores benefícios na categoria DRA-f e GWP e o maior impacto na categoria TH-nc. Os benefícios estão relacionados à redução da exploração de petróleo para fabricação de resinas plásticas (virgem), enquanto o impacto está relacionado ao uso de energia elétrica para moagem e extrusão do plástico durante a reciclagem. A base de dadosecoinvent, utilizada para representar o processo de geração de energia elétrica no Brasil, o bagaço de cana (representa 3% da fonte energética da matriz) carrega parte dos impactos dos agrotóxicos utilizados na plantação na cana-de-açúcar.

Considerações finais

A reciclagem REEEs evita os impactos ambientais na maioria das categorias avaliadas, com exceção das categorias relacionadas à toxicidade humana. Esse paradigma pode ser atenuado com utilização de processos de reciclagem que não utilizem a queima das PCIs para disponibilização dos metais, como por exemplo, os processos hidrometalúrgicos e biohidrometalúrgicos que podem ser alternativas ambientalmente mais corretas para a reciclagem de PCI.

Deve-se atentar que este estudo avaliou apenas o sistema de gerenciamento de REEE por meio da logística reversa e não comparou este sistema aos sistemas alternativos, como aterro, disposição em lixões ou queima a céu aberto dos REEE. Sob esta perspectiva comparativa, os impactos gerados pelo processo de reciclagem de PCI e plásticos, nas categorias de toxicidade humana, podem ser insignificantes.

Este estudo, incluindo comparação com outras formas de gerenciamento de REEE e dados mais representativos, pode ser utilizado como subsídio para avaliação da viabilidade ambiental da implantação de sistema de logística reversa e reciclagem de REEE.

Referências

ABDI (2013). Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos Análise de Viabilidade Técnica e Econômica. Brasília, 2013.

BALDÉ, C.P.; WANG, F.; KUEHR, R. and HUISMAN, J. (2014). The global e-waste monitor. Bonn, Germany, 2014.

BRASIL (2010). Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei no 9605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, 2010.

CAVALCANTE, R. D.; NASCIMENTO, E.V.; ALMEIDA, E. S. and MOITA, M.H.V. (2009) Logística Reversa Como Ferramenta Para Redução Dos Impactos Ambientais : Um Exemplo a Ser Seguindo No Tocante a Reciclagem Química e o descarte de pilhas no Estado Do Amazonas. Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP). Anais...2009

CLASSEN, M.; ALTHAUS, H.J.; BLASER S.; TUCHSCHIMID, M.; JUNGBLUTH, N.; DOKA, G.; FAIST EMMENEGGER, M.; and SCHARNHORST, W. (2009). Life Cycle Inventories of Metal. Final reportecoinvent data V2.1, No 10. EMPA, Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH.

CUI, J. and ZHANG, L (2008). Metallurgical recovery of metals from electronic waste: a review. Journal of hazardous materials, v. 158, n. 2-3, p. 228–56, 30 out. 2008.

EUROPEAN UNION (2002a). Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council on waste electrical and electronic equipment (WEEE).

Official Journal of the European Union, v. 13, n. 2, p. 1–24, 2002a.

EUROPEAN UNION (2002b). Directive 2011/65/eu of the european parliament and of the council on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment. Official Journal of the European Union, v. 54, n. 1 July, p. 88–110, 2002b.

HISCHIER, R.; WÄGER, P. and GAUGLHOFER, J (2005). Does WEEE recycling make sense from an environmental perspective? Environmental Impact Assessment Review, v. 25, n. 5, p. 525–539, jul. 2005.

NICHOLSON, A. L.; OLIVETTI, E.A.; GREGORY J.R.; FIELD, F.R. and KIRCHAIN, R E. (2009). End of Life Allocation Methods: Open Loop Recycling Impacts on Robustness of Material Selection Decisions. IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology OR - IEEE, 2009.

SCHABBACH, L. M.; ANDREOLA, F.; LANCELLOTTI, I. and BARBIERI, L. (2011). Minimization of Pb content in a ceramic glaze by reformulation the composition with secondary raw materials. Ceramics International, v. 37, n. 4, p. 1367–1375, maio 2011.

SCHLUMMER, M.; GRUBER, L.; MAURER, A.; WOLZ, G. and ELDIK, R. (2007). Characterisation of polymer fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE) and implications for waste management. Chemosphere, v. 67, n. 9, p. 1866–76, abr. 2007.

SEPÚLVEDA, A; SCHLUEP, M.; RENAUD, F.G.; STREICHER, M.; KUEHR, R.; HAGELUKEN, C. and GERECKE, A.C. (2010). A review of the environmental fate and effects of hazardous substances released from electrical and electronic equipments during recycling: Examples from China and India. Environmental Impact Assessment Review, v. 30, n. 1, p. 28–41, 2010.

SONG, Q.; WANG, Z.; LI, J. and ZENG, X. (2013). The life cycle assessment of an e-waste treatment enterprise in China. Journal of Material Cycles and Waste Management, v. 15, n. 4, p. 469–475, 2013.

SONG, Q. and LI, J. A. (2015). review on human health consequences of metals exposure to e-waste in China. Environmental Pollution, v. 196, p. 450–461, jan. 2015.

WÄGER, P. A.; HISCHIER, R. and EUGSTER, M (2011). Environmental impacts of the Swiss collection and recovery systems for Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE): a follow-up. The Science of the total environment, v. 409, n. 10, p. 1746–56, 15 abr. 2011.