



## **Definição da sequência operacional e mini fábrica dentro de uma cadeia de reciclagem sustentável para tratamento de REEE**

**Ricardo Soares Rubin<sup>1</sup>, Allan Bruno Rosa<sup>2</sup>, Dennis Brandão<sup>3</sup>**

Departamento de Engenharia Elétrica/ Escola de Engenharia de São Carlos/ Universidade de São Paulo

<sup>1</sup>([ricarubin@yahoo.com.br](mailto:ricarubin@yahoo.com.br)), <sup>2</sup>([allan.antares@gmail.com](mailto:allan.antares@gmail.com)) <sup>3</sup>([dennis@sc.usp.br](mailto:dennis@sc.usp.br))

### **Abstract**

The growing production of electronic waste, or just e-waste, has brought great environmental and human damages, due to toxics elements inside it and from incorrect management of the solid residues of the electr(on)ics equipment (WEEE). Consonant sustainability concept, this paper presents a WEEE treatment model adequate to the reality of Brazilian cities. The proposed model and recently implanted, contemplates social, economic and environmental inclusion. Following this concept, e-waste will be selected for re-use of the equipments yet in operational conditions, aiming creation of informatics centers for digital inclusion. Creation of a mini factory for disassembly of printed circuit boards using technologies with fewer environmental impacts, as part of a whole process of recycling to produce less impure raw material. Complete process will be conduct inside waste piker cooperatives, after its workers participate of skilled courses. Thereby, together job/money generation and knowledge transference, reduces environmental damages. Preliminary results of pilot project started in 2009 on São Carlos city are presented.

Key-Words: WEEE management, PCB disassembly, Sustainability.

Theme Area: Theme 1: Solid Residues.

### **Resumo**

O crescente aumento da geração de lixo eletrônico, ou simplesmente e-lixo, tem gerado grandes danos ambientais e humanos, devido aos elementos tóxicos presentes na sua constituição e provenientes do manejo incorreto dos resíduos sólidos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE). Em consonância com o conceito de sustentabilidade, este artigo propõe um modelo de tratamento de REEE adequado a realidade das cidades brasileiras. O modelo proposto e recentemente implantado, contempla a inclusão social, econômica e ambiental. Dentro desse conceito, o e-lixo será selecionado para re-uso de equipamentos ainda em condições de operação, com o objetivo de criar centros de informática para inclusão digital. A criação de uma mini fábrica para desmontagem de placas de circuito impresso, a partir de tecnologias com o menor impacto ambiental, como parte do processo de reciclagem para geração de matéria prima reciclada com baixo teor de impureza. Todo o processo será operado em cooperativas de catadores de material reciclável, cujos integrantes passarão por cursos de capacitação básica, tecnológica e empresarial. Desta forma, concomitantemente a geração de emprego, renda e transferência de conhecimento, reduz-se o impacto ambiental. Apresentam-se os resultados preliminares do projeto piloto iniciado em 2009 em São Carlos.

Palavras-chave: Gestão de REEE, Desmontagem de PCB, Sustentabilidade.

Área Temática: Tema 1: Resíduos Sólidos.



### 1 Introdução

Uma das características do mundo atual é a rápida inovação no desenvolvimento de produtos e processos, impulsionados pelo consumo de produtos avançados. Maior quantidade e diversidade de equipamentos elétricos e eletrônicos (EEE) são produzidos para substituição de antigos produtos em velocidade crescente. Proporcionalmente, aumenta-se também o volume do chamado lixo eletrônico (e-lixo). O manejo deste tipo de resíduo sólido é urgente devido à presença não só de metais pesados em sua constituição, como de outras substâncias tóxicas. O tratamento do e-lixo, porém, tem se mostrado como um dos grandes desafios da atualidade, não só pelo volume a se processar, mas pela diversidade de equipamentos, produtos e componentes descartados (LI, 2004)(E-WASTE GUIDE, 2009).

As legislações em implantação ao redor do mundo, seguindo o exemplo europeu, têm considerado os fabricantes como responsáveis por toda a cadeia de ciclo de vida do produto (ROTTER, CHANCEREL e SCHILL, 2008). Em função disso, as empresas europeias buscam modificar sua produção para atingir uma quantidade zero de resíduos de forma sustentável. No entanto, as restrições legais locais acabaram por produzir um comércio ilegal de equipamentos não funcionais, sob o rótulo de “segunda mão”, dos países desenvolvidos para os países em desenvolvimento (HUISMAN, 2008)(BAN, 2009).

E é nesses locais, onde o desenvolvimento social e tecnológico começa a dar os primeiros passos ou ainda nem sequer chegou, que o acúmulo de e-lixo traz grandes preocupações uma vez que as técnicas específicas de reciclagem de alto volume/produção nos países desenvolvidos dificilmente poderão ser aplicadas em países em desenvolvimento pelas pessoas que retiram o seu sustento do lixo.

Dessa forma, fica claro que o correto gerenciamento dos REEE pode oferecer grandes oportunidades de desenvolvimento econômico segundo o paradigma do desenvolvimento sustentável, pois ao mesmo tempo em que pode gerar emprego e renda, pode, também, reduzir o impacto ambiental.

No Brasil, em diversas cidades, a coleta seletiva funciona por meio de catadores reunidos em cooperativas. O Ministério do Meio Ambiente reconhece que o trabalho desenvolvido pelos catadores "reduz os gastos públicos com o sistema de limpeza pública, aumenta a vida útil dos aterros sanitários, diminui a demanda por recursos naturais, e fomenta a cadeia produtiva das indústrias recicladoras com geração de trabalho" (MMA, 2009).

Este artigo apresenta uma abordagem para tratamento do e-lixo considerando as características locais de uma cidade de médio porte, onde já operam cooperativas para coleta de lixo reciclável. Tal abordagem baseia-se em um projeto aplicado e prevê fornecer subsídios aos catadores para que possam extrair renda dos REEE sem danos ao meio ambiente ou a própria saúde e de outras pessoas.

Como as cooperativas não trabalham com REEE, o problema enfrentado por este projeto é como fazer da gestão dos REEE uma alternativa economicamente viável para os catadores. Sob o ponto de vista técnico, esse projeto objetiva prover meios para o correto manejo dos REEE sendo o principal constituinte a ser tratado e responsável pelo maior dano ambiental resultante dos EEE, as placas de circuito impresso.

A estrutura deste artigo é composta pelos itens 2 a 4. No item 2, os problemas associados e o processo para reciclagem de placas de circuito impresso são detalhados. O projeto piloto iniciado na cidade de São Carlos e a mini fábrica são discutidos no item 3. No item 4 são apresentadas as conclusões.



## **2 Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE)**

### **2.1 A toxicidade dos REEE**

Os equipamentos elétricos e eletrônicos (EEE) possuem componentes em comum tais como placas de circuitos impressos, cabos e fios, plásticos com tratamento antichama, comutadores e disjuntores de mercúrio, equipamentos de visualização como telas de raios catódicos e telas de cristais líquidos, pilhas e acumuladores, meios de armazenamento de dados, dispositivos luminosos, condensadores, resistências e relês, sensores e conectores entre outros. Todos estes elementos possuem substâncias que podem causar grandes impactos ambientais e à saúde humana.

Substâncias como o chumbo, por exemplo, além de causar danos nos sistemas nervosos central, endócrino e periférico dos seres humanos, pode ainda contaminar o sistema circulatório e os rins (LEAD AND HEALTH, 2009). O mercúrio, por sua vez, quando disperso na água é transformado em metil-mercúrio. O metil-mercúrio acumula-se facilmente nos organismos vivos e concentra-se ao longo da cadeia alimentar. O metil-mercúrio provoca efeitos crônicos e causa danos no cérebro. O TBBA (bisfenol-tetra bromo-A), PBB (bifenil poli bromado) e PBDE (éteres difenílicos poli bromados), utilizados como retardadores de chama principalmente em placas de circuito impresso e cabos, quando incinerados, liberam emissões tóxicas incluindo dioxinas que podem levar a severas desordens hormonais (E-WASTE GUIDE, 2009)(SEPÚLVDA, 2009)(O'CONNELL, 2004).

### **2.2 Tratamento de REEE**

Na comunidade europeia, pioneira na questão de tratamento de e-lixo através da diretiva WEEE-Waste on Electrical and Electronic Equipment, que regula a gestão dos REEE, e estabelece a responsabilidade compartilhada, definindo claramente o papel dos consumidores, revendedores, fabricantes e poder público, o e-lixo retorna em fluxo reverso para empresas que procedem a separação dos materiais, os quais são, em seguida, encaminhados para reciclagem retornando, assim, ao processo produtivo, reduzindo a pressão sobre os recursos naturais ao mesmo tempo em que reduz o impacto ambiental associado ao descarte desses materiais na natureza (HUISMANN, 2008)(NNOROM e OSIBANJO, 2008).

É consenso entre pesquisadores e autoridades que o manejo do e-lixo obedeça a seguinte ordem de prioridade: (DUFLOU, 2008)(STEP, 2009)

1. prevenção;
2. reuso de produto;
3. reuso de componentes;
4. reciclagem;
5. incineração com recuperação de energia;
6. incineração sem recuperação de energia;
7. descarte;

Os itens 1 a 3 contemplam o aumento do tempo de vida do produto e/ou componentes. Neste escopo, conforme mencionado, algumas empresas tem comercializado nos países emergentes, equipamentos adquiridos na Europa e nos grandes centros econômicos asiáticos como produtos de segunda mão. Tal procedimento somente transfere o problema de um local para outro (BAN, 2009).

A reciclagem por sua vez mostra-se como um grande desafio tecnológico a ser enfrentado. Um EEE pode ser entendido basicamente como uma caixa/gabinete contendo as conexões e os elementos ativos, entre eles, a placa de circuito impresso (PCB-printed circuit board). Atualmente somente algumas peças, como a caixa, feita de plástico ou metal, ou fios de cobre com revestimento plástico, são removidos para fins de reciclagem, dada a facilidade com que um operador sem capacitação específica consegue realiza-lo. Essas peças possuem



uma relativa pureza do elemento constituinte, conseqüentemente, um valor comercial alto. As PCB's merecem um maior detalhamento. Feitas de resina onde são montados os componentes, possuem diversas variantes, como o número de camadas, tecnologia de montagem, tipo de placa, e outros que influem diretamente no processo de reciclagem (LI, 2004)(CUI, 2003)(LAYIDING, 2005)(FELDMANN e SCHELLER, 1995).

As tecnologias de reciclagem, de uma forma geral, dividem-se em 4 etapas sequenciais: desmontagem, moagem, separação e refino. Cada etapa tem suas características próprias de funcionamento e otimização (LI, 2004).

- A etapa de desmontagem pode ser seletiva ou simultânea. No primeiro caso, somente os componentes reconhecidamente tóxicos e os de alto valor econômico são retirados. A identificação e localização na placa dos referidos componentes somente pode ser feita por um especialista, tornando a implementação automática extremamente difícil. No segundo caso, desmontagem simultânea, realiza-se a remoção de todos os componentes da placa. Esta tarefa, além de não ser economicamente viável quando realizada manualmente, não é tecnicamente viável, quando realizada automaticamente por um braço robótico (LI, 2004)(HAIHONG, 2007).
- Na segunda etapa, a placa é encaminhada para moagem. O resultado deste processo é de grande importância, pois influi diretamente no processo de separação empregado, uma vez que cada método exige um tamanho e formato específico das partículas para sua otimização. Nos atuais processos de reciclagem, a moagem das placas de circuito impresso é conduzida com a maioria dos componentes ainda montados, deixando-se para a etapa seguinte o trabalho de separação, cuja eficiência depende de muitas variáveis importantes, como por exemplo os tipos de materiais a serem separados. É consenso que a separação prévia dos componentes, ou seja, a desmontagem total da placa traz benefícios e vantagens às etapas de separação e refinamento. Algumas plantas piloto realizam a desmontagem total antes da moagem, mas são plantas dedicadas a um tipo específico de PCB (CUI, 2003)(PENG, 2004).
- A separação de metais, plásticos e resinas é realizada com base no tamanho, densidade, propriedades elétricas ou magnéticas dos materiais a serem separados. A separação por vibração vertical é indicada para a separação de partículas de 150-300  $\mu\text{m}$  e na recuperação de cobre, chumbo, estanho e alumínio. Demais materiais, devido à pequena quantidade presente na composição, não são separados por este processo (CUI, 2003)(PENG, 2004)(LI, 2004).  
A separação por princípio eletromagnético opera em três modos: corrente eddy, eletrostática corona e magnética. As duas primeiras separam metais de não metais e a terceira, plásticos não condutivos de outros materiais. A separação por corrente eddy é utilizada para recuperar alumínio. A separação eletrostática corona opera em partículas de 0.1-0.5mm, isolando plásticos de metais provenientes das PCB's (CUI, 2003).
- O refino dos materiais é realizado pelas mesmas empresas que processam a matéria bruta proveniente das reservas naturais, as quais possuem equipamentos para operar grandes quantidades de material e da maneira correta.

A incineração e o descarte são considerados como último caso e sob condições especiais para que o impacto ambiental associado seja mínimo ou nenhum (O'CONNELL, 2004).



### 3 Organização do projeto piloto

A metodologia adotada no projeto baseia-se na utilização de equipamentos e instalações dedicadas e destinadas ao processamento de REEE, tendo em vista a sua utilização por catadores de materiais recicláveis organizados em cooperativas. Tal metodologia prevê os projetos elétricos, mecânicos e estruturais para tais equipamentos. Desta forma, visa-se a proposta de uma “mini fábrica” capaz de realizar, através de um processo sustentável, as etapas de desmontagem e moagem, cujas operações sejam simples. A mini fábrica deverá operar com uma fonte de energia renovável. Atualmente, os processos de separação e refino são realizados em plantas industriais de grande porte fora do país.

Ressalta-se que a etapa de desmontagem é fundamental para o processo de reciclagem pelas razões já identificadas. Nesta etapa os componentes tóxicos serão identificados e encaminhados para tratamento e correta destinação.

Para que as PCB's cheguem ao estágio de desmontagem, os REEE's devem portanto passar inicialmente por uma etapa de triagem. O que for passível de reuso será destinado ao reuso, o restante será alvo de reciclagem. A identificação das empresas compradoras de material proveniente dos REEE bem como os valores pagos por materiais fornecerá subsídios para avaliar a viabilidade econômica da implantação da gestão dos REEE nas cooperativas. A figura 1 detalha a estrutura explicitada.

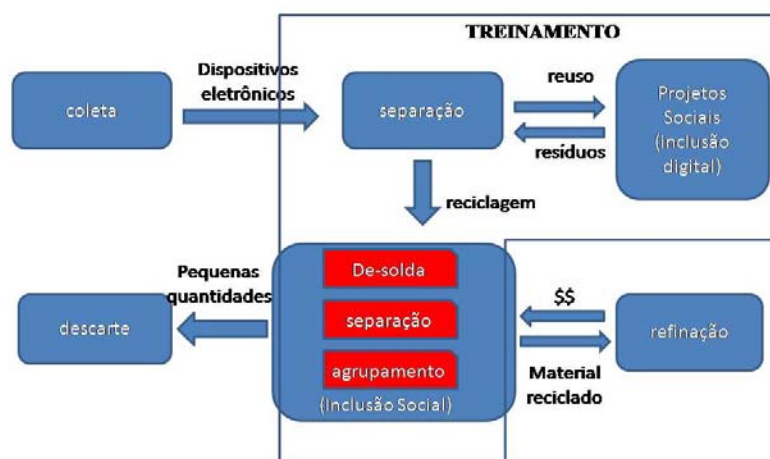


Figura 1: Estrutura operacional do projeto piloto.

O modelo de gerenciamento dos REEE como descrito baseia-se no conceito de rede de criação de valor sustentável, contemplando o desenvolvimento tecnológico, educacional, ambiental e econômico local (WEINERT, SEVERENGIZ e SELIGER, 2008).

#### 3.1 Resultados preliminares: implantação do projeto piloto

No ano de 2009 foram estabelecidas as parcerias entre a prefeitura local, entidades não governamentais e universidades no projeto Recicl@tesc – Reciclagem Tecnológica de São Carlos com o objetivo da implantação do projeto em escala piloto no município de São Carlos.

Em visitas às cooperativas de catadores de materiais recicláveis, constatou-se o incorreto manuseio dos REEE, como observado na figura 2, e a necessidade urgente de alteração no *modus operandi* das cooperativas em relação a esses resíduos. Foi observado ainda o intenso trabalho na esteira de triagem após um dia de coleta, lotando o barracão da cooperativa. Ressalta-se que atualmente os catadores trabalham somente com os materiais



clássicos: plástico, papel, vidro, ferro e alumínio.



Figura 2: REEE indevidamente disposto no barracão da cooperativa.

Com o objetivo de capacitar os catadores para as etapas de desmontagem e separação de peças e componentes de REEE, encontra-se em estágio de elaboração o curso a ser ministrado aos catadores. Referido curso tem por objetivo levar conhecimento a essa parcela da população, contendo informação sobre lixo eletrônico e o modo correto de manusear, testar, reutilizar, reciclar e até descartar. Ao adquirir a capacidade de identificar e selecionar peças funcionais, será possível, numa etapa subsequente, ensinar estes catadores a montar e gerir equipamentos de informática, seja para uso na cooperativa, ou em um centro de inclusão digital que beneficiará não só as cooperativas, mas a população local, notadamente de baixa renda.

Concomitantemente com a capacitação, um estudo realizou o levantamento das empresas compradoras de materiais provenientes de REEE, bem como os valores pagos, para definição do processo de comercialização e da estruturação do plano de negócio a ser implantado.

Foram consultadas 20 empresas, sendo que a partir da resposta de algumas delas, foi elaborada a tabela 1 de preços médio das partes já separadas, de um computador.

Tabela 1: Relação de preço médio pago por quantidade de REEE.

MATERIAL	QUANTIDADE	PREÇO MÉDIO EM R\$
placa leve	Kg	5,50
placa mãe	Kg	4,30
processador cerâmico	Kg	130,00
placa rede/fax	Kg	3,00
placa pesada	Kg	0,60
HD	Kg	0,72
placa celular	Kg	13,00
fonte carregador	Kg	0,15
placa com ponteira	Kg	0,26
processador	Kg	42,00
fonte	Kg	0,30
impressora pequena	unidade	0,30
impressora grande	unidade	0,48
celular com bateria	Kg	1,20
processador de fibra	Kg	50



### 3.2 Mini Fabrica de desmontagem de PCB's

A validação do projeto e estudo de viabilidade técnica e econômica da mini fábrica para desmontagem de PCB's está em fase de elaboração. Para tal, utilizar-se-á a separação simultânea dos componentes de placas PCB de resina, que pode ser atingida com temperaturas ao redor de 200°C, derretendo-se a solda (FELDMANN, 1995)(LAYIDING, 2005)(IJI e YOKOYAMA, 1997). Um forno solar teoricamente pode atingir esta temperatura; é uma fonte de energia alternativa, limpa e renovável. Os países emergentes tem a média anual de luz solar necessária para operar o forno. Por estas razões, o forno solar será utilizado como a unidade de de-solda da mini fábrica (SOLAR OVEN, 2009). As etapas subsequentes do processo de reciclagem serão averiguadas em uma próxima etapa do projeto.

## 4 Conclusões

Face aos impactos causados pelo e-lixo, países, governo, empresas, pesquisadores e a população precisam trabalhar juntos. O conceito de criação de valor para desenvolvimento regional encaixa-se perfeitamente nas necessidades dos catadores em relação ao REEE. Os processos propostos dentro da cadeia de reuso e reciclagem do e-lixo estão baseados no tripé da sustentabilidade, com respeito a responsabilidade econômica, social e ambiental.

A boa receptividade dos demais órgãos parceiros ao projeto mostram que o manejo dos REEE já faz parte da agenda atual dessas instituições, e indica que o estudo proposto apresenta um caminho coerente e adequado à determinação de um modelo de gestão de REEE que contempla as especificidades das cidades brasileiras.

## 5 Agradecimentos

O projeto é uma parceria científica da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade Técnica de Berlim e dos parceiros do projeto Recicl@tesc.

## Referências

BAN, Basel Action Network, acessado novembro de 2009, [www.ban.org/](http://www.ban.org/)

CUI, J.; FORSSBERG, E., “Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review”, **Journal of Hazardous Materials** B99, 2003, p. 243-263.

DUFLOU, J. R.; et al, “*Efficiency and feasibility of product disassembly: A case-based study*”, **In: CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 57, n. 2, 2008, p. 583-600.

E-WASTE GUIDE, acessado novembro de 2009, <http://ewasteguide.info/>

FELDMANN, K.; SCHELLER, H., “*The Printed Circuit Board - A Challenge for Automated Disassembly and for the Design of Recyclable Interconnect Devices*”, **In: CONCEPT - Conference on Clean Electronic Products and Technology**, IEE Conference Publication n. 415, 1995, p.186-190.

HAIHONG, H., et al, “*Study on Disassembling Approaches of Electronic Components Mounted on PCBs*”, Book chapter from “*Advances in Life Cycle Engineering for Sustainable Manufacturing Businesses*”. Springer London, 2007.



HUISMAN, J.; et al, “*Lessons from the 2008 WEEE Review Research Studies*”, **In:** Proceedings of Electronics Goes Green 2008+, setembro de 2008, p. 33-39.

IJI, M.; YOKOYAMA, S., “*Recycling of Printed Wiring Boards with Mounted Electronic Components*”, **Circuit World**, v. 23, n. 3, 1997, p. 10–15.

LAYIDING, W.; et al, “*Disassembling approaches and quality assurance of electronic components mounted on PCBs*”, **In:** Proceedings of the international Symposium on Electronics and the Environment, ISEE, IEEE Computer Society, Washington, DC, maio de 2005, p.116-120.

LEAD AND HEALTH, acessado em novembro de 2009, [www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/contaminants/lead-plomb-eng.php](http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/contaminants/lead-plomb-eng.php)

LI, J.; et al., “*Printed Circuit Board Recycling: A State-of-the-Art Survey*”, **IEEE Transactions on Electronic Packaging Manufacturing**, v. 27, n. 1, janeiro de 2004, p. 33-42.

MMA, Ministério do Meio Ambiente, acessado novembro de 2009, [www.mma.gov.br/sitio/index.php?ido=conteudo.monta&idEstrutura=125&idConteudo=8046](http://www.mma.gov.br/sitio/index.php?ido=conteudo.monta&idEstrutura=125&idConteudo=8046)

NNORON, I. C., OSIBANJO, O., “*Overview of electronic waste (e-waste) management practices and legislations, and their poor applications in the developing countries*”, **ELSEVIER Resources, Conservation and Recycling**, v. 52, 2008, p. 843-858.

O'CONNELL, A. W.; et al, “*Environmental assessment of halogen-free printed circuit boards, a design for environment (DfE) project with the high density packaging user group (HDPUG)*”, **In:** International Symposium on Electronics and the Environment (ISEE'04), 2004, p. 40-45.

PENG, M., et al, “*A physical process for recycling and reusing waste printed circuit boards*”, **In:** Proceedings of the international Symposium on Electronics and the Environment, ISEE. IEEE Computer Society, maio de 2004, p. 237-242.

ROTTER, V. S., CHANCEREL, P., SCHILL, WP., “*Practical Aspects of Individual Producer Responsibility – Lessons to be Learned from Experiences in Germany*”, Electronics Goes Green 2008+, setembro de 2008, p. 47-52

SEPÚLVEDA, A.; et al, “*A review of the environmental fate and effects of hazardous substances released from electrical and electronic equipments during recycling: examples from China and India*”, **Environ Impact Asses Rev** (2009), doi: 10.10106/j.eiar.2009.04.001

SOLAR OVEN, acessado novembro de 2009, [http://solarcooking.wikia.com/wiki/Introduction\\_to\\_solar\\_cooking](http://solarcooking.wikia.com/wiki/Introduction_to_solar_cooking).

STEP, Solving the E-Waste Problem, acessado novembro de 2009, <http://www.step-initiative.org/index.php>

WEINERT, Nils; SEVERENGIZ, Semih and SELIGER, Gunther, “*Sustainable Industrial Value Creation Networks*”. **In:** Proceedings of LCE 2008: 15th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering; 2008, p. 70-75.