

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**CARACTERIZAÇÃO DA ECONOMIA ENERGÉTICA COM A RECICLAGEM
MÁSSICA DE COMPUTADOR: ESTUDO DE CASO NO DISTRITO FEDERAL**

DANIEL SEABRA

ORIENTADOR: ARMANDO CALDEIRA PIRES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

PUBLICAÇÃO: ENM.DM-172A/2012

BRASÍLIA – DF: JUNHO - 2012

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**CARACTERIZAÇÃO DA ECONOMIA ENERGÉTICA COM A RECICLAGEM
MÁSSICA DE COMPUTADOR: ESTUDO DE CASO NO DISTRITO FEDERAL**

DANIEL SEABRA

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE
BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS MECÂNICAS.**

APROVADO POR:

Prof^o Dr^o Armando Caldeira Pires

Prof^a Dr^a Sandra Maria da Cruz

Prof^a Dr^a Andrea Cristina dos Santos

BRASÍLIA/DF 01 DE JUNHO DE 2012.

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade de Brasília. Acervo 1000777.

Seabra, Daniel
S438c Caracterização da economia energética com a reciclagem
mássica de computador : estudo de caso no Distrito
Federal / Daniel Seabra.-- 2012.
107 p. : 30 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade de Brasília,
Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia
Mecânica, 2012

Inclui bibliografia

1. Computadores - Reaproveitamento (Sobras, refugos,
etc.). 2. Energia - Conservação. I. Caldeira-Pires,
Armando. II. Título.

CDU 004.3

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Daniel Seabra

TÍTULO: CARACTERIZAÇÃO DA ECONOMIA ENERGÉTICA COM A
RECICLAGEM MÁSSICA DE COMPUTADOR: ESTUDO DE CASO NO DISTRITO
FEDERAL.

GRAU: Mestre

ANO: 2012

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Daniel Seabra
daniel.seabra@ifgoiano.edu.br

À minha esposa Renata,
com muito carinho, por ser companheira.

Ao meu filho Daniel,
pelos momentos compartilhados.

À minha pequena Gabriela,
por chegar em um momento tão especial
e trazer mais alegria à minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela saúde, proteção e pela força e paciência concedidas nos momentos mais difíceis.

Ao Prof. Dr. Armando Caldeira-Pires pela prestimosa orientação e, assim, por ter me direcionado e ensinado muito ao longo da produção deste trabalho.

Aos meus familiares pela compreensão e apoio nos momentos de dificuldades ao longo dessa caminhada. Ao meu pai Pedro, à minha mãe Maria e aos meus irmãos Maxuel e Raniere pelo apoio nos momentos difíceis e por me compreenderem e reconhecerem a minha conquista com finalização deste trabalho.

Aos amigos e colegas que se dispuseram em ajudar por compartilhar as suas experiências, o meu muito obrigado!

RESUMO

Este trabalho investigou a economia de energia com a reciclagem mássica de computador e em especial, a placa de circuito impresso. Eletroeletrônicos como o computador contém materiais recicláveis com grande potencial de economia energética na produção. Por exemplo, com a produção secundária de cobre pode se economizar cerca de 83% da energia gasta. Na realização da pesquisa, estimou-se qualitativamente e depois quantitativamente, dados que caracterizam a recuperação de materiais do computador em fim de vida. Com a característica da reciclagem do resíduo e valores como o tipo do material, peso, potencial de economia energética, potencial em mitigação da emissão e valor monetário do material estruturaram-se os dados. Depois, no estudo de caso, caracterizou-se o computador quantitativamente no Distrito Federal. Em seguida foi feito o cruzamento desses dados utilizando expressões matemáticas para se chegar aos resultados. Assim, estimou-se que em 2008 havia cerca de 1.383.881 computadores em uso, sendo que esse número pode ter chegado a 2.767.762 em 2012. Considerou-se que o tempo de vida desses computadores seria de 4 anos, portanto, no período de 2008 até 2012 cerca de 1.383.881 computadores chegariam ao fim de vida e de 2012 a 2016 esse número deve chegar a cerca de 2.767.762 unidades. Se os computadores *desktops* em uso no Distrito Federal em 2008, os que chegariam ao fim de vida no período de 2008 a 2012, tivessem sido reciclados haveria uma economia de cerca de 863.624.402 MJ de energia. Assim como em muitos países em desenvolvimento, no Distrito Federal/Brasil não se tem um sistema de reciclagem de computador amplamente instalado. Para que o material desse REEE seja recuperado e assim a energia economizada, faz-se necessário que se tenha um investimento em tecnologia. A simulação da reciclagem do cobre da placa de circuito impresso (PCI) feita com a tecnologia Linha Automática mostrou que a quantidade mínima de PCI para que se tenha viabilidade, é cerca de 5280 toneladas/ano. Dessa forma teria-se uma margem bruta de operação/produto anual de cerca de R\$ 8.845.320,00, o que mostra viabilidade da recuperação desses componentes.

Palavras - chave:

Economia energética, Computador em fim de vida, Reciclagem mássica de Resíduo Eletroeletrônico (REEE), Reciclagem de computador.

ABSTRACT

This paper investigates the energy savings from recycling of computer and masses in particular, the printed circuit board. Electronics such as computer contains recyclable materials with great potential for energy saving in production. For example, with the secondary production of copper can save about 83% of the energy. In this research, it was estimated qualitatively and quantitatively after therefore was used data, characterized the recovery of materials from the computer at the end of life. With the characteristic of recycling of WEEE and values as the type of material, weight, potential energy savings, potential emission mitigation and monetary value of the material was structured data. Then, in the case study, the computer was characterized quantitatively in the Distrito Federal/Brazil. Then the cross was made of these data using mathematical expressions to get the results. Thus, it was estimated that in 2008 there were about 1,383,881 computers in use, with that number in 2012 may have reached 2,767,762. It found that the lifetime of these computers would be four years hence, in the period 2008 to 2012 about 1,383,881 computers reach the end of life and from 2012 until 2016 this number should reach about 2,767,762. If the desktop computers in use in the Federal District in 2008, leading up to the end of life in the period 2008 to 2012, had been recycled would save about 863,624,402 MJ of energy. As in many developing countries, the Federal District / Brazil do not have computer recycling system fully installed. For the material of WEEE be recovered and thus the energy savings, it is necessary that it has an investment in technology. The simulation of the recycling of copper on printed circuit board (PCB) made from the technology Line Automatic proved that the minimum amount of PCB in order to have viability is about 5280 tons a year. Thus one would have a gross margin of operation / annual product of about R\$ 8.845.320,00, which shows the feasibility of recovery of these components.

Keywords:

Save energy, computer end of life, recycling of WEEE, Recycling computer.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTO TECNOLÓGICO	2
1.2 MOTIVAÇÃO	4
1.3 CONTEXTO LEGAL	4
1.4 DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO	6
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1 LEGISLAÇÕES E DIRETIVAS	11
2.1.1 Legislação no Brasil	14
2.2 OS IMPACTOS AMBIENTAIS ASSOCIADOS AO CICLO DE VIDA	16
2.3 TECNOLOGIAS PARA TRATAMENTO DE REEE	22
2.3.1 Métodos de Recuperação da Placa de Circuito Impresso	25
3 - CARACTERIZAÇÃO DE SISTEMAS DO FIM DE VIDA DE COMPUTADORES.....	28
3.1 SISTEMAS DE TRATAMENTO	29
3.2 FLUXOS GERAIS	33
3.3 OS PAÍSES EM DESENVOLVIMENTO	40
3.4 FLUXO NO BRASIL.....	42
3.5 OS PAÍSES DESENVOLVIDOS	44
3.6 CARACTERIZAÇÃO GERAL: MASSA X ENERGIA X ECONOMIA	45
3.7 AVALIAÇÃO DE MASSA <i>VERSUS</i> ENERGIA <i>VERSUS</i> ECONOMIA.....	61
3.7.1 Computador <i>desktop</i>	62
3.7.2 Placa de Circuito Impresso	65
3.8 CARACTERIZAÇÃO NO BRASIL.....	66
4 - ESTUDO DE CASO: FIM DE VIDA DE COMPUTADORES NO DISTRITO FEDERAL	71
4.1 INTRODUÇÃO.....	71
4.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	74
4.3 RESULTADOS	75
4.3.1 Computadores no Distrito Federal em 2008.....	76

4.3.2 Computador na fase final de vida útil no DF.....	79
4.3.3 <i>Desktops</i> no final da vida útil no DF.....	79
4.3.4 ESTIMATIVA COM A RECUPERAÇÃO.....	80
4.3.5 COMPUTADOR <i>DESKTOP VERSUS LAPTOP</i>	81
4.3.6 SIMULAÇÃO DA VIABILIDADE.....	83
4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	87
5 - CONCLUSÃO.....	88
REFERÊNCIAS BIBLIGRÁFICAS.....	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Ciclo de vida de EE, modificado - Bereketli e Genevois (2009).....	10
Figura 2.2: Emissão de CO2 pela produção primária de metal, calculado usando o <i>EcoInvent 2.0</i> (UNEP, 2009).....	20
Figura 2.3: O processo técnico de recuperação de resíduos da PCI, modificado de NIU et. al, (2007).....	25
Figura 3.1: Ilustração da reciclagem mássica (UNEP, 2009).....	29
Figura 3.2: Valor econômico contido numa PCI - valores em centavos (ABRANTES, 2009).....	50
Figura 3.3: Materiais na composição do computador (PNUAM, 2007 e LEITE et. al - Fatores da logística reversa que influem no reaproveitamento do “lixo eletrônico” um estudo no setor de informática, 2009).	58
Figura 3.4: Fluxo ideal para o tratamento do computador no final de sua vida útil.....	61
Figura 3.5: Estimativa de energia economizada, massa e valor monetário de materiais recuperáveis no alumínio, níquel, cobre, aço e chumbo de mil computadores <i>desktops</i>	63
Figura 3.6: Estimativa de economia energética, massa e valor monetário de materiais recuperáveis no epóxi, estanho, ouro, plástico e prata de mil computadores <i>desktops</i>	65

Figura 3.7: Estimativa de REEE de computador (em toneladas) na América Latina, EMPA - Gestión de Residuos Electrónicos en Colombia Diagnóstico de Computadores y Teléfonos Celulares (2008).	67
Figura 3.8: Proporção de utilização de computador por funcionários nas empresas e outras organizações no Brasil, CETIC - Uso das Tecnologias da Informação e da Comunicação (TIC), 2005-2009.....	69
Figura 3.9: Proporção de domicílios com computador no Brasil, IBGE - Síntese de Indicadores (2005-2009).....	70
Figura 4.1: População residente no Distrito Federal, IBGE – CENSO 2998-2010.....	71
Figura 4.2: Domicílios com computador no DF, IBGE - Síntese de Indicadores (2005-2009).....	73
Figura 4.3: Percentual de domicílios com computador no DF, IBGE - Síntese de Indicadores (2005-2009).....	73
Figura 4.4: Pessoas com ocupação no DF (IBGE - Unidades locais, pessoal ocupado total e assalariado, 2005-2009).....	74
Figura 4.5: Estimativa de <i>desktops</i> e <i>laptops</i> no final de sua vida – de 2008 a 2012 no DF.	80
Figura 4.6: Vendas do computador <i>desktop versus laptop</i> no Brasil (modificado de ABINNE – Panorama Econômico e Desempenho Setorial, 2011).	82
Figura 4.7: Percentual de venda do <i>desktop versus laptop</i> no Brasil (modificado de ABINNE – Panorama Econômico e Desempenho Setorial, 2011).	82
Figura 4.8: Estimativa do percentual de <i>desktop versus laptop</i> em fim de vida – 2012 a 2016.	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Composição de eletrônicos selecionados (modificado de CORTI, 2010).....	18
Tabela 2.2: Metais tóxicos e valiosos contido no computador <i>desktop</i> e monitor <i>CRT</i> (modificado de WILLIAMS et. al, 2008).....	19
Tabela 3.1: Comparação de três linhas de produção (LI e XU, 2010)	32

Tabela 3.2: Composição de um computador pessoal <i>desktop</i> e monitor CRT, ~ 27 kg (modificado de MCC, 1996).....	34
Tabela 3.3: Resumo do peso de material contido e peso reciclável, dados de 2005 (modificado de JÖNBRINK e ZACKRISSON, 2007) em gramas	37
Tabela 3.4: Economia energética com a recuperação de materiais em um computador <i>desktop</i> (WILLIAMS, 2003)	38
Tabela 3.5: Economia energética com a recuperação de materiais do CRT de 17 polegadas, modificado de Williams (2003).....	38
Tabela 3.6: Média da concentração de metais preciosos nas placas de circuito impresso dos equipamentos (CHANCEREL et. al, 2009)	39
Tabela 3.7: Energia primária não renovável na manufatura (LOERINCIK, 2006)	40
Tabela 3.8: Estimativa média teórica de peso e tempo de vida de EEE nos países em desenvolvimento (UNEP, 2009).....	41
Tabela 3.9: Quota de recuperação em algumas regiões do mundo (ZOETEMAN et al., 2009).....	45
Tabela 3.10: Resumo da análise e soma energética para produzir o computador <i>desktop</i> utilizando <i>process-sum analysis</i> (WILLIAMS, 2004)	47
Tabela 3.11: Energia usada na manufatura do <i>desktop</i> com monitor CRT de 17 polegadas (WILLIAMS, 2004).....	47
Tabela 3.12: Composição das Placas de Circuito Impresso (ANDRADE, 2002).....	48
Tabela 3.13: Representação dos Materiais Compostos na Placa de Circuito Impresso (WILLIAMS, 2010)	49
Tabela 3.14: Percentagem de metal encontrado em média nos minérios e nas Placas de Circuito Impresso (modificado de VEIT, 2005).....	51
Tabela 3.15: Estimativa de custo energético dos equipamentos utilizados na reciclagem de PCI (VEIT, 2005)	52
Tabela 3.16: Estimativa de custo do ácido sulfúrico usado na dissolução das amostras enviadas para a eletro-obtenção (VEIT, 2005).....	52
Tabela 3.17: Evolução dos preços de certos metais e suas aplicações em equipamentos eletroeletrônicos (HAGELÜKEN, 2008; MANHART, 2010).....	54
Tabela 3.18: Conteúdo do material, valor médio de um PC comum sem monitor e periféricos e preços dos recursos em 2003 e 2007 (GMÜNDER, 2007) e (MANHART, 2010).....	55

Tabela 3.19: Total de peso e valor de materiais recicláveis com o valor encontrado em um computador desktop em 2006 e 2007 (WILLIAMS, 2009)	56
Tabela 3.20: Potencial de mitigação de emissões com reciclagem de metais preciosos do PC <i>desktop</i> (GMUENDER et al., 2007 e MANHART, 2010).	56
Tabela 3.21: Metais perigosos e valiosos contido no computador desktop e monitor CRT (WILLIAMS et. al, 2008)	57
Tabela 3.22: Metais pesados, parte do computador onde é encontrada porcentagem desses metais no computador e o percentual reciclável (SILVA et. al 2008)	59
Tabela 3.23: Consumo de energia na produção primária e secundária de metais em GJ / tonelada de metal (VEIT, 2005)	60
Tabela 3.24: Massa \times economia de energia \times valor em alguns elementos do computador <i>desktop</i> que podem ser recuperados modificado de ^a Willians, 2003; ^b Willians, 2009; ^c Veit, 2005..	62
Tabela 3.25: Massa \times economia de energia \times valor monetário em outros elementos do computador <i>desktop</i> que podem ser recuperados (modificado de ^a WILLIAMS, 2003; ^b WILLIAMS, 2009)	64
Tabela 3.26: Média de concentração de metais preciosos em placas de circuito impresso modificado de ^a Chancerel et. al, (2009) e ^b Manhart (2010).	66
Tabela 3.27: Concentração de cobre, estanho e ouro em PCI e no minério (modificado de VEIT, 2005)	66
Tabela 3.28: Vendas de computadores no Brasil em mil unidades (ABINEE, 2011).....	68
Tabela 3.29: Dados sobre acesso a computadores nos domicílios no Brasil, modificado de Abinne (2010).	69
Tabela 4.1: Letras para se quantificar os computadores no DF.....	76
Tabela 4.2: Alguns materiais que poderiam ser recuperados dos desktops que chegariam ao fim de vida de 2008 a 2012 no DF (modificado de ^a WILLIAMS, 2003; ^b WILLIAMS, 2009).	81
Tabela 4.3: Valores utilizados na estimativa	84
Tabela 4.4: Valores da simulação de viabilidade.	86

LISTAS DE SÍMBOLOS

Símbolos Gerais

3Rs	Reduzir, Reutilizar, Reciclar
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
CE	Equipamento de Consumo
CENSO	Pesquisa realizada pelo IBGE
<i>CERCLA</i>	<i>Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act</i> – Lei de Responsabilidade Ambiental, Reação e Compensação Ambiental
CFC	Clorofluorocarboneto
<i>China's RoHs</i>	Restriction of Hazardous Substances - Regulação para controlar problemas ambientais provocados por eletroeletrônicos na China
CO ₂ eq	Dióxido de carbono equivalente
COFINS	Contribuição para Financiamento da Seguridade Social
CRT	<i>Cathode Ray Tube</i> – Monitor de Tubo de Raios Catódicos
<i>Desktop</i>	Computador de mesa
DF	Distrito Federal (unidade da federação do Brasil)
DVD	Digital Versatile Disc - Disco Digital Versátil
EE	Eleto e Eletrônico / Eletroeletrônico
<i>MJ</i>	Megajoule
Ni	Níquel
°C	Grau Celsius
Pb	Chumbo
PC	Computador Pessoal
PCI	Placa de Circuito Impresso
Pd	Paládio
PERS/MG	Política Estadual de Resíduos Sólidos do Estado de Minas Gerais
Ph	Potencial Hidrogeniônico
PIB	Produto Interno Bruto
<i>PIS</i>	Programa de Integração Social
<i>PLCA</i>	<i>Process LCA</i> – Processo para Avaliação do Ciclo de Vida
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
<i>PWB</i>	<i>Printed Witring Board</i> – Placa de Circuito Impresso

QI	Quoeficiente de Inteligência
REACH	<i>Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals</i> - Regulamento da comunidade Européia sobre os produtos químicos e sua utilização segura
REEE	Resíduo Eletroeletrônico
REP	Responsabilidade Extendida ao Produtor
RoHS	<i>Restriction of Hazardous Substance</i> - Diretiva Européia que proíbe certas substâncias perigosas na manufatura de EE
Sb	Antimônio
SE	Empresa social
SP	Estado de São Paulo
TI	Tecnologia da Informação
TV	Televisão
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i> – Programa Ambiental das Nações Unidas
WEEE	<i>Waste Electrical and Electronic Equipment</i> – Resíduo Eletroeletrônico

Elementos químicos / compostos químicos

Ag	Prata
AL	Alumínio
Au	Ouro
CFC	Clorofluorcarboneto
Co	Cobalto
CO ₂	Dióxido de Carbono
Cu	Cobre
Fe	Ferro
HCFC	Hydrochlorofluorocarbon - hidrocloreofluorocarboneto
In	Índio
Ni	Níquel
Pb	Chumbo
Pd	Paládio
Ph	Potencial Hidrogeniônico
Pt	Platina
Sb	Antimônio

SiO ₂	Óxido de silício
Sn	Estanho
SO ₂	Dióxido de Enxofre
Zn	Zinco

Símbolos de medida

g	Gramma
kg	Kilograma
MJ	Megajoule
ppm	Parte por milhão
t	Tonelada
t/a	Tonelada por ano

Símbolos matemáticos

%	Percentual
=	Igualdade
≈	Aproximadamente
R ²	Representa a distância da reta em relação aos pontos e o índice de confiança do gráfico
X	Multiplicação

1 – INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas a indústria de eletroeletrônicos (EE) tem revolucionado o mundo. Estes estão presentes na vida cotidiana da maior parte da população mundial. Sem esses equipamentos a vida moderna não seria possível. Essa idéia é válida tanto para países industrializados assim como em industrialização. Esses produtos estão presentes em áreas como medicina, mobilidade, educação, saúde, alimentação, comunicação, segurança, proteção ambiental, cultura, entre outras. Tais dispositivos incluem muitos aparelhos domésticos, como máquinas de lavar roupa, telefones celulares, computadores pessoais, impressoras, brinquedos, televisores, etc. (UNEP, 2009).

Quando esses equipamentos não são mais utilizados chegam à fase final de sua vida transformando o EE em resíduo eletroeletrônico (REEE) ou *e-waste* – eletroeletrônico em fim de vida útil. Entretanto, esse resíduo pode e deve ser recuperado e reintegrado ao ciclo de vida para remanufatura (RAMESH-BABU et. al, 2007).

Para realizar a manufatura do eletroeletrônico apenas com materiais primários é necessário um grande consumo de energia e recursos naturais. Nesse sentido é importante considerar que na fase final da vida desses equipamentos, grande parte do material pode ser recuperada e um percentual significativo de energia pode ser economizado.

Particularmente, no caso do computador, há um desperdício energético significativo quando não há recuperação na fase final de sua vida e, ainda, acarreta problemas de poluição ao ambiente. Assim é interessante aplicar meios de recuperação do REEE.

É perfeitamente possível recuperar grande parte das substâncias contidas nos eletroeletrônicos. Isso colabora para minimizar o impacto e o consumo de recursos naturais. A economia energética é um assunto essencial no processo de recuperação do REEE. Segundo Duan (2008), com o tratamento na fase final de vida, o benefício ambiental é bastante significativo.

O objetivo geral deste trabalho é caracterizar o potencial energético e ambiental do computador no final de sua vida útil.

Os objetivos específicos do trabalho são: realizar a caracterização do final da vida útil de computadores, análise comparativa do custo energético de sistemas na disposição final, estudo do aterro sanitário *versus* sistemas de reciclagem mássica e a economia energética e análise comparativa do impacto ambiental provocado pela disposição final dos computadores dispostos adequadamente e inadequadamente.

1.1 CONTEXTO TECNOLÓGICO

Segundo a UNEP (2009), as mais promissoras tecnologias para recuperação de REEE precisam ser identificadas e acompanhadas por meio de instrumentos pertinentes. Particularmente, em muitos países em desenvolvimento, ferramentas e instrumentos são necessários para promover o financiamento da coleta e transferência de inovações tecnológicas no campo da recuperação de REEE.

A recuperação dos eletroeletrônicos em fim de vida pode economizar energia, o que pode minimizar a extração primária de materiais valiosos e raros. Já a disposição inadequada desses resíduos acarreta em problemas ambientais.

Segundo (RAMESH-BABU et al., 2007), os equipamentos eletroeletrônicos são complexos, pois são repletos de diferentes componentes e contém muitas substâncias tóxicas. É conveniente que na sua fase final da vida útil estes sejam recuperados. Dos vários elementos presentes nos REEEs, estima-se que cerca de 66% do peso consiste em metais como ferro, cobre, alumínio, ouro e de outros materiais não-metals, cerca de 34% (RAMESH-BABU et al., 2007).

De acordo com (STREICHER-PORTE, 2006), o resíduo eletroeletrônico contém recursos valiosos que podem ser reciclados. Essas substâncias, quando descartadas de maneira inadequada, podem ser perigosas para o meio ambiente e precisam ser tratadas.

Neste panorama, muitos países lançaram programas para lidar com este desafio. Segundo FREDHOLM et al., (2008), existem mundialmente vários sistemas diferentes para recuperação de REEE. Assim, deve ser estabelecida uma metodologia de análise e comparação.

Existem meios estratégicos para minimizar o consumo material e energético na manufatura do EE. O reaproveitamento em outros fins se dá quando um equipamento é abandonado por não funcionar ou por não atender mais à sua funcionalidade com eficiência, no entanto, pode ser reaproveitado em outro eletroeletrônico para alguma finalidade específica.

Segundo Tsydenova e Bengtsson (2010) eletroeletrônicos contém muitas substâncias agressivas ao ambiente, incluindo metais pesados (por exemplo, mercúrio, cádmio, chumbo, etc.), assim como retardadores de chama (por exemplo, pentabromophenol, éteres difenil polibromados, tetrabromobisfenol, etc.). Devido à presença dessas e outras substâncias, o resíduo eletrônico é considerado como resíduo

perigoso, que, se mal administrado no fim de vida, pode causar riscos significativos para a saúde humana e para o ambiente.

Muitos REEEs não deveriam ser dispostos em aterros ou incinerados em estações de tratamento, mas sim tratados como substâncias perigosas. Além disso, o REEE também contém materiais valiosos, tais como ouro e cobre, que são de considerável valor econômico para a economia (STREICHER-PORTE, 2006).

Segundo Gullett (2006), nos países em desenvolvimento, normalmente a reciclagem é realizada por um pequeno número de programas de reciclagem interna, bem como operações estrangeiras em situação irregulares localizadas em países como a China, a Índia e o Paquistão.

No Brasil o CEMPRE criou um comitê de trabalho especialmente voltado para acompanhar as discussões sobre a reciclagem de eletroeletrônicos no país. De acordo com o CEMPRE (2007), o mercado de reciclagem de eletroeletrônicos no Brasil está em expansão, mas ainda é irrelevante o tratamento adequado de REEE no Brasil.

Em nível mundial, segundo Hobby (2009), em 2006 mais de 8 bilhões de toneladas de lixo eletrônico foram geradas, dos quais apenas 2% do total foi reciclado. Por outro lado, computadores e outros equipamentos eletrônicos de escritórios são responsáveis por 40% de chumbo e 70% dos metais pesados, tais como mercúrio e cádmio em aterro sanitário.

Hobby (2009) demonstra que a Tecnologia da Informação (T.I.) representa 2% das emissões globais de CO₂, equivalente à indústria da aviação. Dessa forma, há uma necessidade significativa para se reduzir o impacto ambiental.

1.2 MOTIVAÇÃO

No Distrito Federal há uma grande quantidade de computadores. Segundo o IBGE - Síntese de Indicadores (2009), em 2009 cerca de 62% dos domicílios tinham computador, enquanto que a média nacional no mesmo ano era 34,7%.

A reciclagem dos materiais economiza energia na produção. Assim é interessante reciclar o REEE. Já que o consumo energético é um assunto que se torna mais importante com o passar do tempo.

Assim como na maior parte do país, o Distrito Federal não apresenta um programa de gerenciamento de REEE eficiente amplamente difundido. Portanto é interessante discutir a reciclagem mássica desse resíduo.

1.3 CONTEXTO LEGAL

A legislação serve como base para a implantação de um gerenciamento adequado de REEE, assim é interessante observar as legislações já existentes. Nesse sentido, outro passo importante, diz respeito a buscar meios de gerenciamento e tratamento para REEE de empresas que já possuem experiência e que tenham suas práticas já bem consideradas. Outro fator que necessita ser levado em consideração é a especificidade e a realidade de cada região.

Como mostram Fredholm et al. (2008) na ausência de legislação, os sistemas de reciclagem de resíduo eletroeletrônico são limitados à reciclagem privada de alto valor de resíduos, com apenas a participação de poucos consumidores.

Segundo Zoeteman et al. (2009), a Convenção de Basileia de 1989 estabeleceu requisitos em nível mundial para a circulação de resíduos perigosos e passou a obrigar as partes a minimizar a geração desses resíduos e assegurar uma gestão ecologicamente correta. A União Européia transpôs a Convenção de Basileia pelo Regulamento nº 259/93 (regulamento sobre transferências de resíduos) e, a partir de 1998, proibiu a exportação de resíduos perigosos.

De acordo com Magalini e Huisman (2007), a União Européia acumulou experiência com regulamento para REEE e diretivas oficiais passaram a ser adotadas. Isso permitiu adquirir experiência com a legislação em vigor.

Segundo Mayers et al. (2005), em fevereiro de 2003, foi implantada a diretiva europeia para resíduos eletroeletrônicos. Esta diretiva obriga os produtores de equipamentos eletroeletrônicos a preverem o retorno e tratamento final dos seus produtos na fase final de sua vida útil. Dependendo da categoria do produto eles devem ser reciclados a proporções de 50% a 80% em massa.

Por outro lado, para Zoeteman et. al (2009) uma política de intervenção regulatória é necessária em nível geral e regional. Entretanto, empresas enfrentam problemas ao procurar adaptar os seus negócios para atender aos seus critérios de sustentabilidade.

No que diz respeito à Europa, Walther (2009) mostra que reduzir a quantidade da disposição de resíduos e resgatar os recursos naturais é o objetivo da Diretiva Europeia para equipamentos eletroeletrônicos que estão no final de sua vida útil (Diretiva WEEE).

Assim, Franz (2010) mostra que embora os regulamentos europeus convençam os cidadãos que a indústria eletrônica está limpa, todo o fluxo fora da União Europeia, principalmente, em relação às fases pré-uso do ciclo de vida, não são abrangidos pela regulamentação. Portanto, há pouco incentivo para as áreas da indústria e da economia de auto-regulação sobre o ponto de vista global.

No Brasil, de acordo com os dados da (UNEP, 2009), a inexistência de uma lei para tratamento de resíduos sólidos era um obstáculo. Mas, em 2010, foi aprovada a POLÍTICA NACIONAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS, que é um marco importante.

Por outro lado, apesar de existir a proibição em países desenvolvidos, a exportação de REEE para países em desenvolvimento é uma questão que a Interpol tem indicado a sua prática, especialmente, com o desempenho de membros do crime organizado (INTERPOL, 2009).

De acordo com a Interpol (2009), grande parte da evidência sobre os mecanismos de exportação desses produtos, bem como o funcionamento deste setor ainda é algo misterioso. O volume de resíduo eletrônico é estimado em milhões de toneladas, podendo incentivar uma indústria ilegal significativa e altamente rentável.

Segundo Krikke (2008), há vários acordos internacionais para regular o comércio de resíduos tóxicos, mas, a corrupção, a interpretação extensiva das regras e as fraudes são atividades que estão presentes no comércio.

1.4 DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

Para a elaboração deste trabalho foi realizada uma extensa revisão bibliográfica em artigos científicos, dissertações, teses, livros e relatórios pertinentes ao contexto da caracterização da recuperação material e economia energética do REEE. Como resultado desse estudo, foi possível estruturar os aportes teóricos envolvidos na gestão de REEE. Assim, o trabalho visa mostrar qual é a característica do computador em fim de vida em relação à recuperação na fase fim de vida, e os principais métodos para recuperação – como a pirólise; pirometalurgia; redução mecânica; reciclagem e incineração. Portanto foi feito o desenvolvimento de pesquisas em publicações referentes ao fluxo do computador de modo geral (mundo e Brasil) e de forma mais específica no Distrito Federal. Em seguida estimou-se o quantitativo de computadores que chegam ao final de sua vida útil, assim como resultados do desempenho de massa *versus* energia *versus* economia desses equipamentos que estão no final de sua vida útil.

O primeiro capítulo traz o embasamento teórico desta dissertação, traçando os objetivos, motivação e contextualização para fundamentar os capítulos seguintes.

O capítulo seguinte (capítulo 2), na sua primeira parte, mostra uma breve avaliação bibliográfica do ciclo de vida do eletroeletrônico com ênfase na fase final de sua vida útil e o impacto do REEE. Em seguida descreveram-se as principais legislações ligadas direta e indiretamente aos equipamentos eletroeletrônicos no final da sua vida funcional. Assim, a discussão procura enfatizar a legislação dos países desenvolvidos como a União Européia, e dos países em desenvolvimento como o Brasil. Depois se discorreu sobre o impacto associado ao ciclo de vida do eletroeletrônico com ênfase na fase final de sua vida buscando mostrar as características e impactos nesta fase. Logo em seguida foi apresentada a avaliação das melhores técnicas e tecnologias utilizadas para tratamento de REEE em fim de vida, especialmente abordando aspectos da economia de energia e a recuperação de materiais de computadores e placas de circuito impresso (PCI). Deste modo, nessa parte são apresentadas e questionadas as técnicas e processos tecnológicos a respeito do tratamento de computador na fase final de sua vida útil, os processos pertinentes são pirólise, pirometalurgia, redução mecânica, reciclagem e incineração.

No capítulo 3 são descritas as características e sistemas de tratamento do REEE, em especial do computador. A primeira parte desse capítulo descreveu os tipos básicos de sistemas de tratamento em diversas partes do mundo. Em seguida, foi realizada uma

descrição do fluxo geral do computador, buscando mostrar as suas devidas características ao longo do fluxo. A terceira parte tem o intuito de mostrar o fluxo do REEE e sistemas de tratamento nos países em desenvolvimento, descrevendo os problemas comuns e destacando algumas regiões por serem mais interessantes no que diz respeito aos problemas e oportunidades de recuperação. Já na quarta parte, descreveu-se o fluxo característico do REEE nos países em desenvolvimento, mostrando características comuns nessas regiões. Em seguida, na quinta parte investigou-se pelo contexto a situação do gerenciamento de REEE no Brasil, apesar de haver poucas publicações, ficou claro que o Brasil ainda não tem um sistema de remanufatura amplamente instalado. Depois se descreve a característica das regiões desenvolvidas no que se diz respeito ao gerenciamento do REEE. Em seguida, na sexta parte do capítulo, foi realizada uma caracterização geral utilizando diversas publicações gerais a respeito do REEE, em especial do computador. Essa caracterização mostra resultados referentes à massa \times energia \times economia. Neste capítulo o tratamento de PCI teve especial atenção. Os resultados são interessantes pela recuperação e mitigação de custos posteriores. Na sétima parte fez-se avaliação de massa \times energia \times economia, em especial do computador *desktop* fazendo estimativa da recuperação de dez elementos compostos e discorreu-se a respeito da recuperação de PCI mostrando o teor da concentração de materiais compostos comparando-os com o percentual em relação ao minério. Por último, na oitava parte fez-se a caracterização do Brasil, comparando com o percentual de REEE no Mundo e América Latina. Depois mostrou-se o fluxo quantitativo interno que no capítulo quatro foi utilizado como estudo de caso.

O capítulo 4 apresentou o estudo de caso do computador no final de sua vida funcional no Distrito Federal, procurando mostrar as características da região que influenciam a presença de um grande número de computadores. Mostrou o quanto poderia ser recuperado de dez materiais selecionados e energia economizada dos computadores *desktops* (sem monitor e periféricos) que chegariam ao final de sua vida útil no Distrito Federal, no período de 2008 a 2012. Depois fez-se uma simulação da reciclagem mássica da placa de circuito impresso utilizando a Linha Automática, onde estima a margem bruta de operação/produto da recuperação do cobre. Em seguida, com base nos valores, estimou-se qual é o quantitativo mínimo de placa de circuito impresso para que se viabilize a implementação de uma a tecnologia no Distrito Federal.

O capítulo 5 traz a conclusão de todo o trabalho, fez-se uma retomada do motivo, contexto e objetivos do trabalho. Depois mostrou os métodos utilizados para se chegar aos

resultados. Em seguida descreveu-se como desenvolveu o trabalho e mostra os principais resultados. Definindo as propostas para trabalhos futuros.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O impacto ambiental negativo do computador no final da sua vida útil está relacionado principalmente à sua disposição em aterro comum. Já a recuperação material com a economia energética aproveita recursos valiosos e ainda contribui para a diminuição do impacto negativo sobre o ambiente.

Por outro lado, o tempo de vida do computador está diminuindo e vários são os fatores que influenciam para o seu curto tempo de uso, entre eles estão o poder econômico do proprietário, a oferta de outras inovações, a obsolescência planejada, etc. Segundo Andrae e Andersen (2010), o tempo de vida do eletrônico varia bastante entre diferentes regiões.

De acordo com Hai-Yong e Enung (2006), o período de vida útil do computador está diminuindo como resultado de mudanças das características e da capacidade dos equipamentos. O fluxo de REEE criado por esses dispositivos eletrônicos obsoletos está crescendo rapidamente.

Loerincik (2006) realizou um trabalho buscando mostrar o impacto que a Tecnologia da Informação e Comunicação provoca, utilizando o processo ¹*Input-Output* para fazer Avaliação Ambiental do Ciclo de Vida. Assim, o autor descreveu que provoca impacto significativo no meio ambiente. Argumentou que é importante tratar adequadamente o computador no final da sua vida funcional para mitigar a energia gasta para produzir materiais e diminuir a emissão de CO₂.

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta que permite a quantificação das emissões ambientais ou análise do impacto ambiental de um produto, sistema ou processo. Essa análise é realizada por visualizar toda a “vida”, por exemplo, desde a extração da matéria-prima no caso de um produto até o final da vida (quando se torna resíduo), passando por todas as etapas intermediárias, como a manufatura, transporte e uso.

Segundo Genevois e Bereketli (2009), no final da vida útil de um produto ele pode ser descartado, ou ainda reutilizado para estender seu ciclo de vida. Mas o ideal é que na fase final da sua vida útil real, o material passível de recuperação seja recuperado.

De acordo com Loerincik (2006), a avaliação do impacto ambiental de um produto e do seu ciclo de vida pode ser dividida basicamente em três fases: manufatura, uso e fim

¹ Ferramenta para Avaliação do Ciclo de Vida.

de vida. Esses estágios podem ser inventariados para ter resultado dos fluxos de emissões ambientais e do impacto ambiental do produto.

Na fase final da vida útil de um equipamento há diversas possibilidades: o equipamento pode passar por manutenção e ser reusado; o equipamento pode se tornar útil para o reaproveitamento de materiais. Se o equipamento não pode ser reusado nem reciclado pode ser incinerado para a geração de energia e para a redução de massa, assim como ilustrado na Figura 2.1.

No entanto, é possível observar que a economia energética ocorre em mais de uma situação, por exemplo, a recuperação do material pode evitar o consumo de energia para produzir materiais a partir de recursos primários.

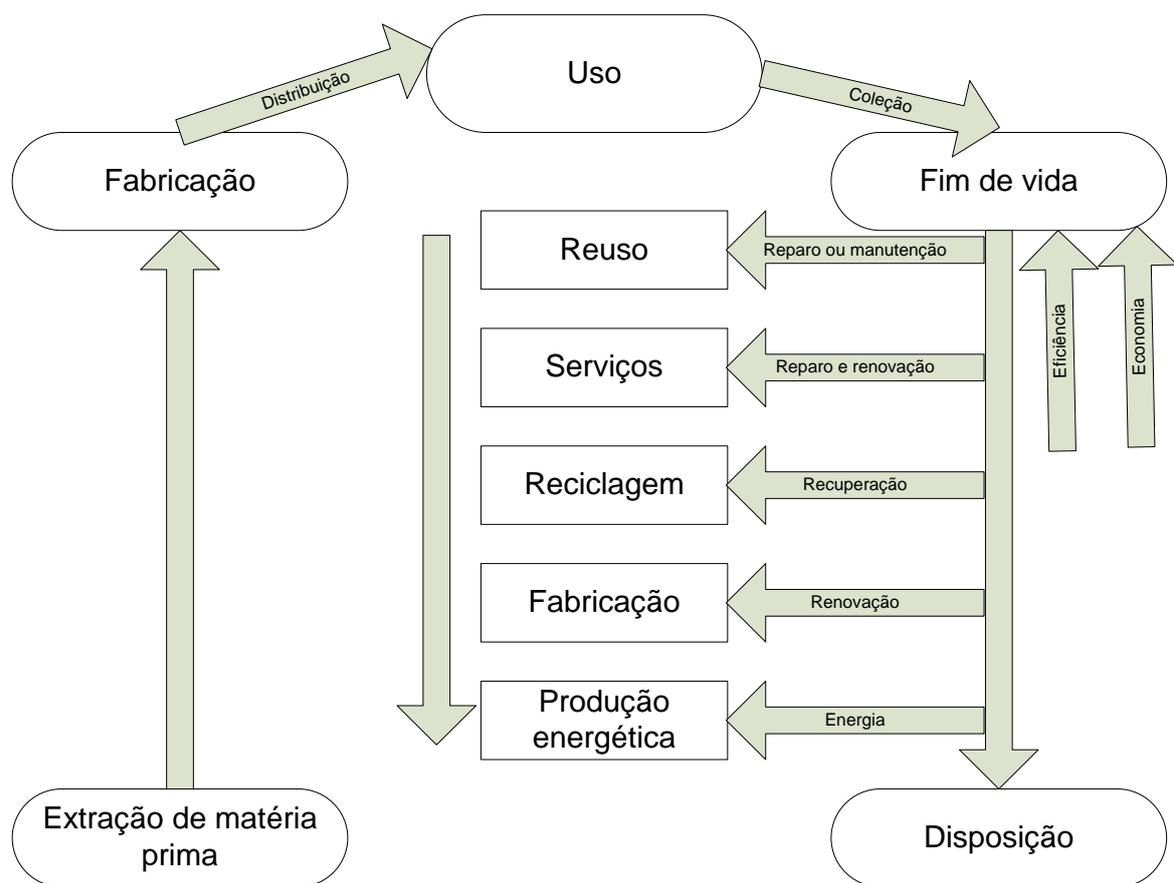


Figura 2.1: Ciclo de vida de EE, modificado - Bereketli e Genevois (2009).

2.1 LEGISLAÇÕES E DIRETIVAS

A legislação é a base para a aplicação do gerenciamento adequado de REEE. Nos países desenvolvidos, geralmente, a legislação está mais bem elaborada e estabelecida, quando comparada aos países em desenvolvimento.

Nesse contexto, a União Européia (UE) está bem estruturada e tem servido de base para outros países. O Japão também tem se mostrado como influente na legislação ligada ao REEE.

Segundo Kandlikar e Ogushi (2007), a responsabilidade do gerenciamento de resíduos dirigida ao produtor foi efetivada na União Européia nos anos de 1990. Essa abordagem tem cinco pontos essenciais: responsabilidade dos produtores; mecanismos de cumprimentos; papel da autoridade local; mecanismo de financiamento; mérito e limite.

Goodman (2008) mostra que na União Européia existe legislação que restringe o uso de certas substâncias em eletroeletrônicos. As diretivas mais interessantes para EE são ²*EU RoHS* e ³*REACH*.

No Japão, adotou-se em 2001 um novo quadro jurídico para promover mudanças sociais e tecnológicas no ciclo de vida do material. Três leis básicas foram estruturadas: a responsabilidade das entidades, das indústrias e dos projetos. Assim, os recursos são utilizados de forma mais eficaz, seguindo o princípio dos 3Rs (reduzir, reutilizar e reciclar) (KANDLIKAR e OGUSHI, 2007).

Por outro lado, segundo Kojima et al. (2008), os países em desenvolvimento têm dificuldade em implantar a Responsabilidade Dirigida ao Produtor. A maior dificuldade da implantação seria identificar e controlar o mercado informal. O mercado cria forma de tratamento que não corresponde à realidade, ou seja, o controle da veracidade é dificultado.

Yang (2008) mostra que a China, em particular, é um grande produtor, consumidor e exportador de produtos eletrônicos para o mundo. O governo tem incentivado a regulamentação do gerenciamento do REEE e ⁴*China's RoHs* foi implementada (para se aproximar a *EU RoHs*).

² Diretiva Européia que proíbe certas substâncias perigosas na manufatura de EE (Diretiva 2002/95/EC).

³ Regulamento da comunidade Européia sobre os produtos químicos e sua utilização segura (EC 1907/2006).

⁴ Política Chinesa para restringir substâncias perigosas nos produtos eletrônicos.

Segundo Hicks et al., (2005), a China tem um extensivo mercado informal de resíduos, em especial de REEE. A reciclagem informal desses resíduos acontece na maior parte do país.

Já na América Latina, segundo Silva et. al, (2010), existe a necessidade de uma legislação específica para REEE. Os motivos que levam a essa necessidade são a magnitude do problema e a expansão desses resíduos. Nesse sentido, é importante tentar limitar a quantidade da disposição.

Em particular no Brasil, a legislação relacionada ao REEE ainda é recente, mas a Política Nacional dos Resíduos Sólidos veio ascender à esperança de aplicações para o gerenciamento adequado de resíduos sólidos. Trata-se de uma legislação que demorou cerca de 20 anos para ser aprovada e que foi assinada no dia 2 de agosto de 2010.

Dentre a legislação pertinente a resíduos sólidos e resíduos eletroeletrônicos de cunho internacional, as principais leis são as da Europa, conforme relacionada a seguir:

- a. Convenção de Basiléia – a Convenção de Basiléia tem por objetivo controlar o fluxo transfronteiriço de resíduos perigosos.
- b. Emenda a Convenção de Basiléia – a proibição de exportar resíduos perigosos dependia da proibição no país importador. Na segunda conferência em 1994 acordaram que a partir de 31 de dezembro de 1997 também seria proibido exportar resíduos perigosos aos países que não tem essa restrição.
- c. Protocolo de Montreal – é um tratado global escrito em 16 de setembro de 1987 e em vigor desde Janeiro de 1989, que tem por objetivo proteger a camada de ozônio.
- d. Estocolmo – é um instrumento internacional que regula a tramitação das substâncias orgânicas persistentes. Esse acordo foi firmado em 2001 por 127 países e entrou em vigor em 17 de maio de 2004.
- e. Convênio de Rotterdam – foi adotado no dia 10 de setembro de 1998 e entrou em vigor dia 24 de fevereiro de 2004. Seus objetivos são os seguintes:

- Promover a responsabilidade compartilhada entre as partes, na esfera comercial de certos produtos químicos perigosos com a finalidade de proteger a saúde humana e o meio ambiente.
- Contribuir para a utilização racional dos recursos naturais.

Segundo Goodman (2008), a *RoHS Directive*, Diretiva 2002/95EC de 27 Janeiro de 2003 que restringe o uso de certas substâncias perigosas, seis substâncias perigosas para equipamentos eletroeletrônicos: chumbo e seus compostos, cádmio e seus compostos, mercúrio e seus compostos, cromo hexavalente (mas não de metal cromo ou cromo em outros estados de oxidação), retardadores de chama e éter (família de retardadores de chama).

O Artigo 6º da *Directiva RoHS* exige que a Comissão Europeia reveja vários aspectos dentro de 4 anos após sua adoção. As principais questões a ser consideradas são:

- A possibilidade de restringir mais substâncias perigosas.
- A possibilidade de incluir outras categorias, como dispositivos de medicina e instrumentos de monitoramento e controle no âmbito da *RoHS*.

Segundo Genevois e Bereketli (2009), vários objetivos da ⁵*EuP* têm sido favorecidos, como assegurar a livre circulação de produtos que usam energia com a *UE* para melhorar o desempenho ambiental de produtos eletrônicos e para proteger o ambiente e contribuir para o aproveitamento energético.

Já nos países em desenvolvimento, que ainda não têm legislação nacional relevante especialmente para o tratamento adequado do *REEE*, está em ascensão à criação de instrumentos legais para possibilitar o gerenciamento mais adequado.

Os problemas ambientais provocados pelo *REEE* associado à necessidade de uma legislação que impõe artifícios de controle e recompensa justificam a necessidade de legislar em defesa do meio ambiente. A legislação é capaz de criar meios para retribuir o gasto com a preservação ambiental, beneficiando o indivíduo que contribui para a preservação do meio ambiente.

⁵ Diretiva Européia que estabelece um *framework* para *ecodesign* na utilização de energia nos produtos.

2.1.1 Legislação no Brasil

No Brasil, embora já exista a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010, observa-se que não é amplamente cumprida. Portanto, para que tenha um melhor gerenciamento dos resíduos sólidos como o REEE, faz-se necessários métodos de regulamentação e controle por parte do governo.

Entre os objetivos da Política Nacional dos Resíduos Sólidos, destacam-se a necessidade da redução do volume e da periculosidade dos resíduos perigosos. A seguir, foram selecionadas as partes da Política Nacional dos Resíduos Sólidos (LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010) que trazem expectativas para melhorar o gerenciamento do REEE:

Art. 7º São objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos:

IV - adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas como forma de minimizar os impactos ambientais.

V - redução do volume e da periculosidade dos resíduos perigosos.

Na Política Nacional dos Resíduos Sólidos ainda está prevista a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos. A responsabilidade abrange os fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, os consumidores e os titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos:

Art. 33 São obrigados a estruturar e implementar sistemas de logística reversa, mediante retorno dos produtos após o uso pelo consumidor, de forma independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de:

II - pilhas e baterias;

V - lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista;

VI - produtos eletroeletrônicos e seus componentes.

Apesar de a Política Nacional dos Resíduos Sólidos ser um marco importante, as falhas por não se aplicar a legislação fazem com que o gerenciamento dos resíduos

eletroeletrônicos seja muito aquém do adequado. É preciso um avanço na elaboração de leis reguladoras para aprimorar o gerenciamento do resíduo eletroeletrônico.

Na verdade, existem algumas iniciativas de gerenciamento adequado do REEE isoladas, principalmente, no estado do Ceará, São Paulo, e Minas Gerais. No entanto, essas iniciativas ainda precisam de um maior apoio político.

A Política Estadual dos Resíduos Sólidos do Estado do Ceará (Lei nº 13.103, de 24 de janeiro de 2001), traz princípios interessantes no tocante a preservação do meio ambiente e a redução de resíduos perigosos. Como a geração de energia ou diminuição do consumo energético. No Art.11, por exemplo, está descrita em sua disposição geral.

Art.11. A gestão dos resíduos sólidos observará as seguintes etapas:
IV - a recuperação ambientalmente segura de materiais, substâncias ou de energia dos resíduos ou produtos descartados.

Segundo Medeiros (2011), a gestão de resíduos sólidos apresentada pela Política de Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo possui quatro instrumentos de planejamento e gestão. São os planos de resíduos sólidos, o sistema declaratório anual de resíduos sólidos, o inventário estadual de resíduos sólidos e o monitoramento dos indicadores da qualidade ambiental. Como exemplo, no *Artigo 2º* (LEI ESTADUAL Nº 12.300, DE 16 DE MARÇO DE 2006).

Artigo 2º - São princípios da Política Estadual de Resíduos Sólidos:
VI - a minimização dos resíduos por meio de incentivos às práticas ambientalmente adequadas de reutilização, reciclagem, redução e recuperação.

Em 6 de julho de 2009 o Governo do Estado de São Paulo promulgou a Lei 13.576, que legisla sobre o gerenciamento e a destinação final do lixo tecnológico. Esta lei coloca certa responsabilidade para a destinação final dos equipamentos eletroeletrônicos sobre aqueles que os produzem, comercializam ou importam tais produtos e seus componentes. Porém, a lei não prevê nenhum tipo de participação do estado na reciclagem ou destinação final destes produtos (OLIVEIRA, 2010).

Já a Política Estadual de Resíduos Sólidos do Estado de Minas Gerais tem um diferencial interessante, em relação à do Ceará e São Paulo. Essa política traz significativa obrigatoriedade de participação do poder público, no Art. 8º e 9º descrevem-se os objetivos e como alcançá-los (Brasil, LEI Nº 18.031, DE 12 DE JANEIRO DE 2009).

Art. 8º. A Política Estadual de Resíduos Sólidos tem por objetivos:

I - estimular a gestão de resíduos sólidos no território do Estado, de forma a incentivar, fomentar e valorizar a não-geração, a redução, a reutilização, o reaproveitamento, a reciclagem, a geração de energia, o tratamento e a disposição final adequada dos resíduos sólidos;

Art. 9º. Para alcançar os objetivos previstos no art. 8º, cabe ao poder público:

U - a implementação de novas fontes de informação sobre o perfil e impacto ambiental de produtos e serviços, por meio do incentivo à autodeclaração na rotulagem, à divulgação de dados sobre a avaliação do ciclo de vida do produto e à certificação ambiental; gestão dos resíduos sólidos.

Segundo (MEDEIROS, 2011), na Política Estadual de Resíduos Sólidos do Estado de Minas Gerais (PERS/MG), a avaliação do ciclo de vida do produto é definida como “o estudo dos impactos causados à saúde humana e ao meio ambiente durante o ciclo de vida do produto”.

2.2 OS IMPACTOS AMBIENTAIS ASSOCIADOS AO CICLO DE VIDA

Segundo Corti (2010), os materiais contidos nos eletroeletrônicos em fim de vida são grandes em número e valor; muitos são valiosos e outros são tóxicos ou perigosos.

Dentre os elementos químicos típicos encontrados estão:

1. Os metais preciosos como ouro, prata, paládio, platina e rutênio;
2. Metais especiais, tais como ferro, cobre, alumínio, níquel, zinco, estanho, cobalto, gálio, índio e selênio;
3. Metais perigosos como o mercúrio, berílio, cádmio, arsênio e antimônio;
4. Halogênios - flúor, bromo e cloro;
5. Outros compostos como plástico, vidro e cerâmica.

Quando essas substâncias são depositadas em aterros, como por exemplo o mercúrio e chumbo, são potencialmente contaminantes. Assim, além de provocar um efeito ácido no ambiente, pode provocar problemas a saúde dos animais, plantas e ao ser humano.

Essas substâncias ainda podem contaminar o lençol freático prejudicando uma grande região. Essas substâncias também podem ser ingeridas por animais que vão adoecer e depois depositar o resíduo perigoso em alguma parte do ambiente.

Corti (2010) ainda mostra que quando há disposição desses resíduos sem nenhum tratamento adequado, passam a representar um alto risco de danos ambientais. Além disso, os metais preciosos são desperdiçados e, com isso, aumenta-se a necessidade de novos recursos primários.

Composições típicas de uma série de eletrônicos são mostradas na parte superior da Tabela 2.1. Em termos de peso, plásticos e aço tendem a ser a maior parte, mas em termos de valor, a parte inferior da Tabela 2.1, metais como o ouro e os outros metais preciosos dominam e representam mais de 80% do valor em placas de computador *desktop* (CORTI, 2010).

De acordo com Spalvins (2008), são vários os elementos perigosos em materiais contidos no REEE que podem contaminar o meio ambiente. Entre esses materiais, o chumbo é o elemento químico mais perigoso contido em eletroeletrônicos.

As substâncias contidas nos equipamentos eletroeletrônicos são valiosas e o reaproveitamento desses materiais diminui a extração primária. Os computadores ainda contêm materiais tóxicos como o chumbo, mercúrio e arsênio. Elementos perigosos presente em computadores *desktops* e monitores CRTs são mostrados na Tabela 2.2 (WILLIAMS et. al. 2008).

Observado por meio de lentes, placa de circuito impresso e monitores CRT de computadores são classificados como resíduos perigosos pelos padrões de *Toxicity Characteristics Leaching Procedure* (TCLP). Este processo envolve a moagem do material, colocando-o numa solução ácida ($\text{pH } 4.93 \pm 0.05$). Depois mede os níveis de chumbo, mercúrio e outros metais pesados que vazem após 18 ± 2 horas. Os testes têm mostrado que a PCI e monitores CRT têm excedido os padrões de lixiviação. Entretanto testes têm mostrado que computadores *desktop* e *laptop* também são considerados perigosos devido à concentração de chumbo.

Tabela 2.1: Composição de eletrônicos selecionados (modificado de CORTI, 2010).

Composição							
Percentual em relação ao peso					Parte por milhão		
Partes	Fe	Al	Cu	Plásticos	Ag [ppm]	Au [ppm]	Pd [ppm]
Placa de monitor	30%	15%	10%	28%	280	20	10
Placa de PC	7%	5%	18%	23%	900	200	80
Telefone móvel	7%	3%	13%	43%	3000	320	120
Áudio portátil	23%	1%	21%	47%	150	10	4
DVD	62%	2%	5%	24%	115	15	4
Calculadora	4%	5%	3%	61%	260	50	5
Percentual de valor em relação ao peso							
Valor por parte	Fe	Al	Cu		Ag	Au	Pd
Placa de monitor	4%	14%	35%		7%	33%	7%
Placa de PC	0%	1%	13%		5%	69%	12%
Telefone móvel	0%	0%	6%		11%	71%	11%
Áudio portátil	3%	1%	73%		4%	16%	3%
DVD player	15%	3%	30%		5%	42%	5%
Calculadora	1%	4%	10%		6%	76%	3%

Fonte: Sustainable Recycling of Electronic Scrap (CORTI, 2010).

Segundo a UNEP (2009), a eletrônica é responsável por quase 80% da demanda mundial de índio (utilizado em LCD), mais de 80% de rutênio (utilizado em *hard disks*, HD) e 50% de antimônio. Alguns desses metais são importantes para geração de energia renovável, por exemplo, o selênio, telúrio e índio podem ser usados em painéis fotovoltaicos. Atualmente, a produção primária (mineração) desempenha o papel mais importante no fornecimento de metais para manufatura de equipamentos eletrônicos. Os metais secundários só estão disponíveis em quantidades muito pequenas.

De acordo com os dados da UNEP (2009), o impacto ambiental provocado pelos metais primários utilizados para produção é bastante significativo, especialmente, no que diz respeito aos metais preciosos e especiais que são extraídos a partir de minérios nos quais a concentração desses metais é baixa. Quantidades consideráveis de terra são retiradas pela mineração. Águas residuais e dióxido de enxofre (SO₂) são gerados do consumo de energia e são consideráveis as emissões de CO₂. Por exemplo, para produzir uma tonelada de ouro com extração primária são emitidos cerca de 17.000 toneladas de CO₂.

Tabela 2.2: Metais tóxicos e valiosos contido no computador *desktop* e monitor *CRT* (WILLIAMS et. al, 2008).

Elemento	Montante por unidade: <i>desktop</i> com monitor CRT em (g)
Alumínio	680 – 960
Antimônio	2,4 - 17,5
Arsênico	0,06
Bismuto	0,23
Cádmio	3,28
Cromo	0,05
Cobre	1370 - 2640
Ouro	0,39 - 0,67
Índio	0,04
Aço	7300 – 8880
Chumbo	620 – 1373
Níquel	4,5 – 30
Platina	0,92
Prata	0,86 - 2,64
Estanho	67
Zinco	21

Fonte: Sustainability review of the international reverse chain for reuse and recycling of computers, Williams (2008).

Segundo a UNEP (2009), os valores acumulados dos metais indicados na Figura 2.2, representam um nível de emissões anual em CO₂ de 23,4 milhões de toneladas, quase 1 / 1000 das emissões de CO₂ do mundo. Isso não inclui as emissões de CO₂ com a obtenção de outros metais usados em equipamentos eletroeletrônicos como o níquel, aço ou alumínio, nem outras emissões de CO₂ associadas à produção ou utilização de equipamentos eletroeletrônicos.

Contudo, segundo UNEP (2009), a recuperação de metais por meio do processo de reciclagem reduz a emissão de CO₂ e também traz vantagens significativas em relação à mineração em termos de uso do solo e emissões perigosas. Por exemplo, a produção de 1 Kg de alumínio por reciclagem usa apenas 1/10 ou menos da energia necessária da produção primária e evita a criação de 1,3 kg dos resíduos de bauxita, 2 kg de emissões de CO₂ e 0,011 kg das emissões de SO₂, assim como a redução dos impactos e das emissões associadas à produção dos elementos de liga.

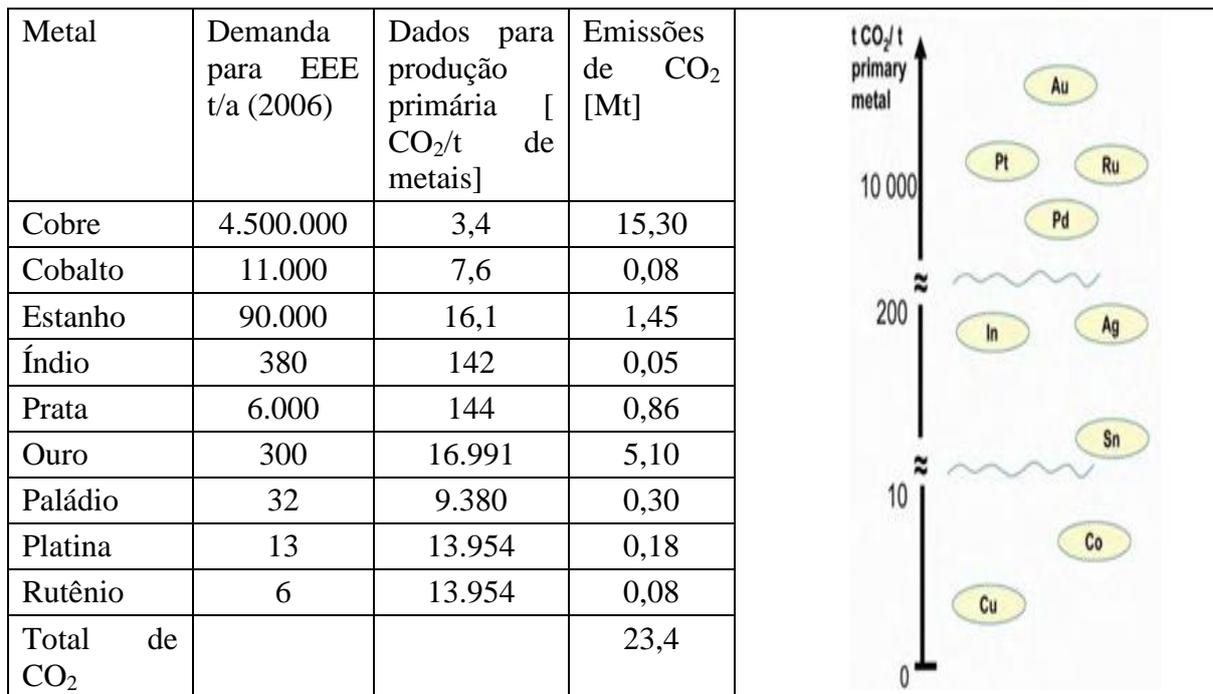


Figura 2.2: Emissão de CO₂ pela produção primária de metal, calculado usando o *EcoInvent 2.0* (UNEP, 2009).

Segundo Hobby et. al (2009), o REEE seria responsável por 5% dos resíduos sólidos em aterros americanos e está aumentando a uma taxa de 3% a 5% ao ano, três vezes mais rápido do que o fluxo de resíduos em geral.

Ainda segundo Hobby et. al (2009), em particular a indústria de TI, é responsável por significativa mudança climática. Em relação as emissões, se comparar a emissão da TI na produção de equipamentos com a aviação seria quase equivalente.

O descarte descontrolado desse REEE e o gerenciamento inadecuado ou insuficiente da recuperação de materiais geram significativas emissões perigosas, com graves impactos à saúde e ao meio ambiente. Neste contexto, há três níveis de emissões tóxicas distintas:

- Emissões primárias: as substâncias perigosas que estão contidas no lixo eletrônico, por exemplo o chumbo, mercúrio, arsênico, bifenilos policlorados, fluidos refrigerantes etc;
- Emissões secundárias: produtos da reação de substâncias perigosas (resíduo eletroeletrônico) como resultado do tratamento inadequado, por exemplo, dioxinas

ou furanos formado por incineração da fundição inadequada de plásticos com retardantes de chamas halogenados;

- Emissões terciárias: as substâncias perigosas ou de reagentes que são usados durante a recuperação (por exemplo, agentes de lixiviação, mercúrio para a amalgamação de ouro) e que são liberados devido ao manuseio e tratamento inadequado.

Entretanto, a grande ênfase em muitas organizações e governos para reciclar equipamentos eletrônicos descartados se dá devido a preocupação referente ao destino dos descartes de produtos químicos potencialmente perigosos ou tóxicos.

Segundo Ryan et. al., (2010) o destino típico de eletroeletrônicos, como exemplo o monitor LCD, é o aterro e essa forma de disposição restringe o potencial de recuperação e reuso dos materiais, ou seja, o reaproveitamento do aço, do alumínio, do cobre, etc. Assim, para conservar a matéria prima e para proteger o meio ambiente é essencial substituir o tradicional fluxo de produtos desde o fabricante até o aterro sanitário, por uma nova postura de recuperação.

De acordo com a estimativa de Chancerel et. al (2009) a quantidade de metais preciosos contidos nas Placas de Circuito Impresso é bastante significativa. Por exemplo, em uma tonelada de PCI, apenas de prata, ouro e paládio é possível extrair cerca de 562 g, 126 g, 48 g, respectivamente.

Segundo Keller (2006) na Placa de Circuito Impresso está contido 2/3 do ouro contido no computador, ou seja, cerca de 0,2 gramas. Como o ouro se trata de um metal precioso, raro e valorizado comercialmente, seria importante a sua recuperação.

Segundo MCC (1996), os equipamentos eletroeletrônicos contêm vários materiais valiosos. Por exemplo, o computador *desktop* com monitor tem cerca de 0,0016 kg de ouro e muitos outros elementos. Nesse sentido, é preciso pensar na recuperação desses materiais contidos nos computadores que estão sem funcionalidade.

Segundo Veit (2005), a recuperação de metais a partir da produção secundária é viável, pois gera uma economia significativa de energia. Na produção de cobre, por exemplo, a economia pode chegar a 83%, se comparada à produção primária.

Segundo Williams (2004), o total de energia e material fóssil consumido na produção do computador *desktop* com monitor CRT de 17 polegadas é cerca de 7.320 MJ, o que comprova que o consumo de energia para produção é bastante intensivo.

Em 1993 a MCC fez um estudo e concluiu que seria gasto cerca de 8.300 MJ de energia para produzir uma estação de trabalho. Nesse sentido, seria interessante reaproveitar materiais desses equipamentos que estão no final de sua vida útil para diminuir o consumo energético gasto na manufatura.

Williams (2004) também mostra que no ciclo de vida de um computador, ao contrário de outros equipamentos eletroeletrônicos, o maior consumo de energia está na produção, uma média de 83%. Já na fase de uso com a operação o consumo passa para cerca de 17%.

De acordo com Manhart (2010) os preços dos metais aumentaram significativamente nos anos que antecedem a 2010. Por exemplo, o cobre no período de 2003 até 2007 aumentou 285%. A alta dos preços desses recursos indica uma oportunidade para se introduzir formas mais sustentáveis de gestão do REEE no mundo.

2.3 TECNOLOGIAS PARA TRATAMENTO DE REEE

Como a produção de eletroeletrônicos a partir de materiais primários provoca um significativo impacto ambiental e a recuperação do REEE pode reaproveitar materiais valiosos que podem ser novamente inseridos na manufatura. Nesse sentido é conveniente utilizar-se de meios eficientes que venham a mitigar o problema do consumo excessivo de energia e material primário, ao invés de simplesmente despejar o REEE onde não é devido.

O problema da disposição inadequada é bastante caracterizado quando o REEE é tratado como lixo comum e disposto em aterro sanitário, muitos desses aterros não têm o tratamento adequado.

Assim, o aterro compromete o ambiente, pois o terreno que contém o resíduo fica disposto somente para esse propósito e, dificilmente, o ambiente poderá ser utilizado para outros fins.

O REEE precisa de um gerenciamento eficiente para mitigar o problema do consumo energético excessivo e da emissão poluente. Assim, é preciso utilizar melhores

técnicas e tecnologias que venham melhorar a eficiência energética e contribuir para a preservação ambiental.

De acordo com Fisher et. al (2005), é necessário alcançar um equilíbrio aceitável entre o impacto ambiental e o crescimento tecnológico. Em outras palavras, produtos e sistemas devem ser investigados de uma forma mais realista, a partir da perspectiva de sustentabilidade.

O gerenciamento do eletroeletrônico na fase final de sua vida tem ramificações diferentes no mundo, mas muitos países estão certos de que precisam enfrentar o problema e lidar com esse desafio. Desafios similares existem em vários países dos continentes (OGONDO et al., 2010).

Segundo a UNEP (2009), a inovação no tratamento do REEE deve incidir sobre as principais necessidades para melhorar a sustentabilidade. Os objetivos gerais da recuperação de eletroeletrônico no final da sua funcionalidade – como os critérios da separação de REEE – devem ser cumpridos. A mitigação do impacto pode ser derivada da melhora na coleta, na desmontagem, no pré-tratamento e na manipulação de resíduos perigosos, assim como na gestão de interface ao longo da cadeia de recuperação.

De acordo com Chancerel et. al (2009), a tarefa a ser realizada na fase final da vida útil de um equipamento é recuperar os materiais com eficiência, ou seja, devem ser utilizados os processos, tecnologias e técnicas eficientes.

Segundo Bereketli et. al (2011) existem três diferentes formas básicas de tratamento para eletroeletrônico na fase final da sua funcionalidade: a reutilização, a recuperação e a disposição. Embora os métodos de reutilização e recuperação exijam maiores custos de investimento e infra-estrutura tecnológica, tais tratamentos são muito mais seguros que a disposição em aterro e também contribuem para a conservação de recursos escassos.

Mas é importante observar que a reutilização apenas prolonga o tempo de vida do eletroeletrônico que depois precisa ser reciclado. Por outro lado, a disposição inadequada desperdiça a energia e contamina o meio ambiente. A recuperação é a forma mais indicada para recuperar e preservar os recursos na fase final da funcionalidade de um equipamento.

Segundo Oliveira (2010), o tratamento da placa de circuito impresso é complexo, e várias tecnologias têm sido desenvolvidas e/ou aprimoradas para reciclagem. Os processos podem ser mecânicos, químicos ou térmicos.

Os principais processos utilizados são pirometalurgia, hidrometalurgia, eletrometalurgia, biotecnologia e processos mecânicos (cominuição, classificação e separação). Dentre os processos de tratamento possíveis, o tratamento mecânico é o menos agressivo ao ser humano e aos seres vivos por gerar menos resíduos contaminantes (OLIVEIRA, 2010).

Segundo Morais (2011), o processamento mecânico envolve essencialmente operações unitárias de tratamento de minérios visando a separação física ou a concentração de materiais a partir de sucatas de equipamentos eletroeletrônicos. Esse processo envolve principalmente etapas como desmantelamento, moagem, classificação granulométrica, separação em meio denso, flotação, atrição, separação magnética e separação eletrostática.

Segundo Manhart e Andres (2010), apesar das fronteiras entre os sistemas de recuperação serem complexas, em certa medida, há basicamente três tipos de abordagens de recuperação de metal que são realizadas em diferentes regiões do mundo: Tipo 1: baixa tecnologia, baixo rendimento; Tipo 2: Média Tecnologia, o rendimento médio, poluição extrema; Tipo 3: alta tecnologia, alta produtividade, baixa poluição.

Niu et. al (2007) estabeleceram um modelo para a recuperação de materiais de Placas de Circuito Impresso (PCI). O processo e a técnica são mostrados na Figura 2.3; uma máquina de trituração é usada para esmagar os resíduos, em seguida o resíduo triturado é levado ao moleiro a ser triturado. Depois da britagem e moagem, os materiais derivados com água são enviados para o separador. O separador de água serve como meio, uma vez que a densidade do cobre é maior do que os materiais não-metálicos, juntamente com a agitação do separador, os fluxos de cobre são conduzidos até o fim do separador, enquanto que os materiais não-metálicos, cuja densidade é menor, são levados no fluxo para o tanque para separação. Assim, a separação dos materiais é realizada devido às diferentes densidades. Dessa forma, o metalóide é enviado para o desidratador . Após a desidratação, os equipamentos são introduzidos para mover o metalóide no secador para finalizar o processo de recuperação.

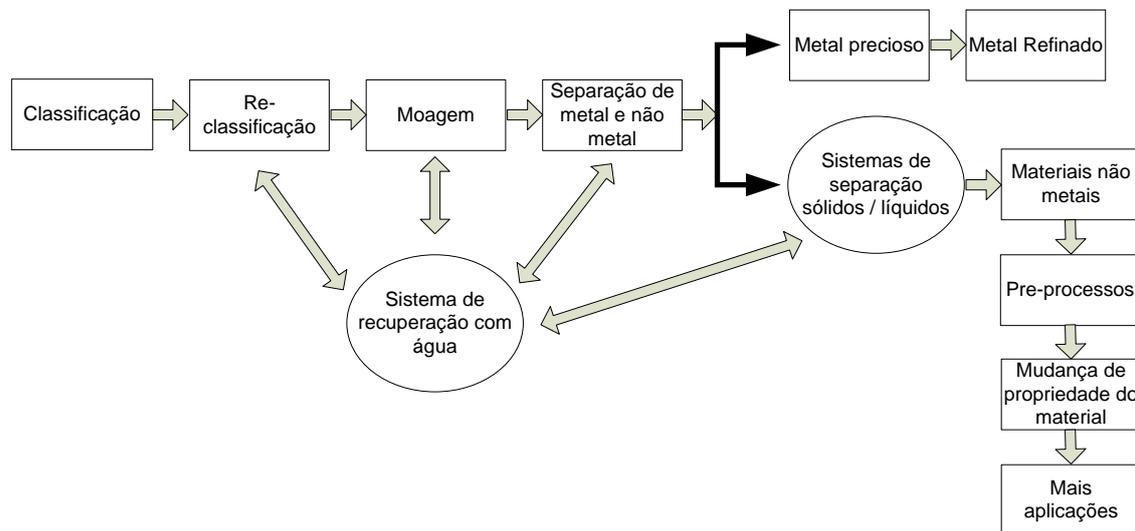


Figura 2.3: O processo técnico de recuperação de resíduos da PCI, modificado de NIU et. al, (2007).

Abrantes (2009) realizou um trabalho no qual buscou estudar o comportamento das placas de circuito impresso durante a operação de processamento físico, inserido em um processo por via pirometalúrgica. Segundo ele se a reciclagem do equipamento não for viável é preciso efetuar uma valorização energética para aproveitamento da energia. Esta opção, de incineração é uma solução que minimiza o impacto ambiental. Só depois dessas etapas é que se deve optar pela deposição do resíduo em aterro.

2.3.1 Métodos de Recuperação da Placa de Circuito Impresso

Pirometalurgia

Morais (2011) mostra que os processos pirometalúrgicos se caracterizam pelo uso de alta temperatura para o processamento dos materiais. Segundo Andrade (2002), na fase da pirólise as temperaturas variam entre 150 °C e 1600 °C. Ainda segundo Morais (2011) o mecanismo do processamento pirometalúrgico visa promover a concentração de uma fase metálica e uma fase contendo escória. Na fase metálica os metais estarão em maior concentração, pois os materiais cerâmicos ficam concentrados na escória e os polímeros são degradados termicamente por meio da quebra de ligações químicas das cadeias orgânicas através do calor.

O processo de pirólise pode ser definido como sendo o de decomposição química por calor na ausência de oxigênio. Segundo Andrade (2002), o balanço energético do sistema da pirólise é normalmente positivo, pois produz mais energia do que se consome.

Andrade (2002) ainda mostra que a pirólise é um processo que leva vantagem entre todos os outros até então conhecidos, como a incineração e compostagem. Mas a pirólise não pode substituir todos os outros sistemas de tratamento, pois tem pela sua grandiosidade de projeto um elevado custo operacional. Embora possa diminuir consideravelmente o fluxo de massa.

Hidrometalurgia

Segundo Abrantes (2009), apesar de os sistemas de tratamento de placa de circuito impresso atualmente ser essencialmente pirometalúrgicos, tem sido feito um esforço no sentido de aumentar a eficiência energética, utilizando processos hidrometalúrgicos centrados no tratamento químico.

De acordo com Volsky e Sergievskaya (1978) e Morais (2011), os processos hidrometalúrgicos são processos entre a interface de uma fase sólida com uma fase líquida.

Esses processos inicialmente envolvem operações unitárias de lixiviação de materiais, sucata, resíduos ou minérios nos quais ocorre a dissolução de metais pela ação de soluções aquosas ou agentes lixiviantes. Assim, pode ou não ser seletiva com relação aos materiais que serão solubilizados (JACKSON, 1986; MORAIS, 2011).

Após as etapas de lixiviação é comum utilizar técnicas hidrometalúrgicas como a extração por solvente, a precipitação e o refino eletrolítico, favorecendo a seletividade dos materiais (MORAIS, 2011).

Processamento Mecânico

Segundo Veit (2005), os processos mecânicos de materiais de placas de circuito impresso têm sido utilizados como parte de etapas de tratamento e beneficiamento de minérios na metalurgia primária. O processamento mecânico de sucatas é visto, em geral,

como um pré-tratamento para o real reaproveitamento do material, e associa diferentes estágios de separação de compostos e componentes de resíduos.

Veit (2005) mostra que fazem parte do processamento mecânico entre outras, a cominuição, a classificação granulométrica, a separação gravimétrica, a separação magnética, a separação eletrostática, etc.

Segundo Moraes (2011), o processamento mecânico envolve principalmente operações unitárias de tratamento de minérios visando à separação física ou a concentração de materiais a partir das sucatas de equipamentos eletroeletrônicos.

O computador em fim de vida é composto por materiais que podem ser reciclados economizando energia, pois na extração primária dos materiais se gasta muita energia. Assim como pode também mitigar a poluição ambiental.

3 - CARACTERIZAÇÃO DE SISTEMAS DO FIM DE VIDA DE COMPUTADORES

Tem sido crescente, nos últimos anos, a preocupação com equipamentos eletrônicos no fim de sua vida útil, assim como é preocupante o consumo energético exagerado porque aumenta o impacto no meio ambiente. Mas os recursos secundários podem ser recuperados para economizar a energia na produção e diminuir o impacto ambiental.

No REEE estão presentes vários metais pesados que além de serem prejudiciais à vida contêm valor energético e monetário significativo. Materiais como o ouro, por exemplo, têm grande potencial de economia energética na recuperação. Nessa abordagem é conveniente avaliar sistemas de recuperação, em especial do computador na fase final de sua vida. O computador contém vários metais preciosos que podem ser reaproveitados.

Entretanto, o componente mais interessante do computador para recuperação de materiais valiosos é a placa de circuito impresso (PCI). A PCI é um componente básico, largamente utilizado em toda a indústria eletrônica, especialmente, a indústria de informática, sendo constituída por uma placa (ou cartão) onde são impressas ou depositadas trilhas de cobre (ANDRADE, 2002).

O tratamento de placas de circuito impresso é um processo bastante complexo devido à grande heterogeneidade da sua composição e também devido à difícil compatibilidade com o meio ambiente (VEIT, 2005).

Segundo Niu et. al (2007), a recuperação racional (adequada) de placa de circuito impresso desempenha a parte fundamental no tratamento do REEE. As evoluções das técnicas de tratamento consistem na eficiência de materiais recuperados, o reaproveitamento energético e a economia energética. Geralmente, as tecnologias de reciclagem para placa de circuito impresso são hidrometalurgia, pirometalurgia, metalurgia de reciclagem mecânica e uma junção desses métodos (CHEN-LONG et. al, 2010). A Figura 3.1 ilustra o computador e monitor em fim de vida, em especial a placa de circuito impresso (PCI), assim como a recuperação. Esses e outros eletrônicos devem ser reciclados para diminuir o consumo energético na produção.



Figura 3.1: Ilustração da reciclagem mássica (UNEP, 2009).

3.1 SISTEMAS DE TRATAMENTO

É desejável que os sistemas para o tratamento de REEE sejam eficientes e que os seus efeitos negativos sejam o mínimo possível. Segundo Andrade (2002), no processo de incineração é possível aproveitar energia, gerando calor e energia elétrica e reduzir a quantidade de resíduos sólidos em até 90%, transformando o material sólido em efluente gasoso que é disperso na atmosfera, após tratamento, embora ainda restem cinzas e escória. Um incinerador pode ser operado sem provocar agressões ao meio ambiente, com a implantação de precipitadores de partícula, filtros, lavadores de gases, etc.

Ainda segundo Andrade (2002), no sistema de tratamento com a pirólise o balanço é normalmente positivo, pois produz mais energia do que se consome. Este, sem dúvida, é um fator importante para que esse processo continue sendo pesquisado.

A reciclagem é uma das formas mais atraentes para solucionar os problemas do gerenciamento de resíduos. Esse processo é viável por permitir a recuperação de matéria prima, economizar energia e por propiciar a preservação do meio ambiente (ANDRADE, 2002).

A redução mecânica é uma técnica que abrange dois grandes processos de tratamento de resíduo. O primeiro é chamado de trituração ou moagem e o segundo, a compressão ou enfardamento. Em ambos os casos obtém-se uma redução do volume de resíduo (ANDRADE, 2002).

Segundo Abrantes (2009), atualmente os processos de reciclagens de placa de circuito impresso são essencialmente pirometalúrgicos, como resultado de um esforço no sentido de procurar novas alternativas que tornem todo o processo mais eficiente, não apenas do ponto de vista ambiental, mas também energético. No entanto, o processamento

industrial utiliza as duas vias, via hidro e pirometalúrgica, no sentido de obter uma maior recuperação de todos os metais.

Segundo Manhart (2010), é possível observar que as atuais práticas de recuperação de metal do REEE são diversas, desde a reciclagem manual, com baixos rendimentos para a refinação até os processos que utilizam tecnologia de qualidade. Embora as fronteiras entre os sistemas de recuperação sejam complexas, em certa medida, há basicamente três tipos de abordagens de recuperação de metal que são realizadas em diferentes regiões do mundo:

Tipo 1: baixa tecnologia, baixo rendimento

Em um cenário de problemas graves de poluição, especialmente, em muitos países em desenvolvimento, o REEE é visto principalmente como fonte de peças de reposição para a indústria da remanufatura de EE. As tecnologias para recuperação de metais são limitadas, de modo que as frações de REEE que não são adequadas para receber reabilitação recebem pouca atenção. No entanto, o metal fácil de ser reciclado manualmente é recuperado em trabalho intensivo e informal e depois levado às metalúrgicas. Dentre esses metais estão inclusos o aço, o alumínio, cobre, a partir de bobinas e motores e o alumínio do dissipador de placa de circuito impresso. Outras frações de REEE, incluindo aquelas que contêm metais raros são eliminadas ou queimadas. O método de queima de cabos para recuperar o cobre é bastante utilizado.

Tipo 2: Média tecnologia, o rendimento médio e a poluição extrema

Em algumas economias emergentes, além da recuperação manual de aço, alumínio e cobre, tal como praticada na abordagem do tipo 1, a recuperação do ouro em placa de circuito impresso com a lixiviação química úmida é praticada. Os métodos de recuperação detalhados são descritos por Keller (2006). O trabalho de Keller utilizou a ferramenta *input-output* e análise de dados que incluem as seguintes etapas: os dispositivos eletrônicos são desmontados manualmente; o ouro contido nas peças, incluindo os conectores e placas de circuito impresso, é colocado em uma solução de cianeto que extrai o ouro exposto; a solução contendo ouro é então tratada com alumínio e prata, que libera o ouro dos

complexos de cianeto; após a filtragem, a escória restante é purificada em uma sequência de fusão, moagem, fervura, separação da prata e o derretimento final. Para facilitar os processos, vários produtos químicos adicionais, tais como o ácido nítrico e calcário são adicionados. Ocorre perdas do ouro de 50% a 84%.

Tipo 3: alta tecnologia, alta produtividade e baixa poluição

Em alguns países industrializados, os metais de REEE são tratados por uma combinação de pré-tratamento mecânico e processos de refino metalúrgico. Durante o pré-tratamento o material é picado ou esmagado e, em seguida, mecanicamente classificado em frações de saída definida. Para evitar os altos custos, a desmontagem manual é mantida a um mínimo. As frações de saída, ou seja, a fração magnética, a fração de alumínio, a fração de cobre, a fração de plástico, a fração de plástico misto, o vidro, a borracha etc. são então passadas para outro tratamento no país ou no exterior, dependendo da disponibilidade e capacidade da refinação. As frações magnética e de alumínio são tratadas em fundições de aço e alumínio, a fração de cobre em fundições de cobre. Esses resíduos são transferidos para processos de refinarias especializadas que são capazes de recuperar uma grande variedade de metais. Pode ser recuperado vários metais como cobre, ouro, paládio, índio, antimônio, estanho e prata. As taxas de recuperação relacionadas às concentrações do material estão acima de 95% para metais preciosos e cobre, principalmente da placa de circuito impresso.

Como é possível observar nos tipos de tratamento de REEE, a eficiência na recuperação de metais depende da tecnologia empregada para tal.

Li e Xu (2010) compararam três técnicas utilizadas na recuperação de metais em placa de circuito impresso, linha de produção tradicional, processos de países desenvolvidos e a linha automática. Segundo os autores a linha automática tem menor consumo de energia e melhor racionalidade tecnológica, assim como não é agressiva ao ambiente. O custo dessa linha é aceitável para processos local (em *Shanghai* na *China*). A comparação dessas três linhas de produção mecânica é mostrada na Tabela 3.1.

Como pode se observar, a linha de produção tradicional apresenta baixo índice de recuperação de metal e seu lucro bruto foi menor. O processo de países desenvolvidos tem alto consumo de eletricidade, pelo que o seu lucro bruto foi muito menor do que a linha automática e o custo do equipamento é elevado para os processos da região. Comparado

com as outras linhas de produção, a linha automática tem menor consumo de energia e melhor racionalidade com a tecnologia.

Tabela 3.1: Comparação de três linhas de produção (LI e XU, 2010).

Expressão	Linha de produção tradicional	Processos de países desenvolvidos	Linha automática
<i>saída (ton/hora)</i>	0,3	0,3	0,3
<i>Energia Eletrica (kWh)</i>	200	400	130
<i>Recuperação de metal (%)</i>	menos que 80%	maior que 90%	maior que 90%
<i>Operadores /hora</i>	10	4	4
<i>Problema ambiental</i>	desperdício de água	Nenhum	nenhum
<i>Custo de manutenção (\$/ton)</i>	4.95	2.95 ^a	2.95
<i>Custo (\$/ton)</i>	1422.45	1490.85	1363.65
<i>Lucro bruto (\$/ton)</i>	17.55	129.15	256.35

Fonte: Environmental Friendly Automatic Line for Recovering Metal from Waste Printed Circuit Boards, 2009.

^aO custo de manutenção do processo de países desenvolvidos foi considerado o mesmo com a linha automática.

Na simulação utilizou-se do seguinte método para avaliar o custo e lucro bruto: (A) é o custo do material (placa de circuito impresso em fim de vida) que é igual a \$ 1285 (U.S.) por tonelada e o percentual de cobre contido no material é mais de 30%; (B) é o salário dos operadores que seria cerca de \$ 1.62 (U.S.) por hora; (C) é a vida de uma linha automática que é cerca de 10 anos e o tempo de trabalho 8 horas por dia; (D) é o custo de energia elétrica que era \$ 0.116 (U.S.) por *kilowatt-hora* (em *Shanghai*); (E) é o preço do cobre recuperado e foi assumido \$ 6000 (U.S.) por tonelada; (F) é o custo de manutenção que inclui o desgaste da máquina e manutenção de filtros que é igual a \$ 2.95 (U.S.); *saída (ton/hora)* é 30%, ou seja, 0.3 toneladas de cobre reciclado para cada tonelada de placa de circuito impresso. Então podem ser computados o custo e lucro bruto de cada linha. Nas equações 3.1 e 3.2, respectivamente, mostram a simulação dos valores para a linha automática:

$$\text{custo} = A + \frac{B}{\text{saída}} + \frac{C}{10 \times 365 \times 24 \times 0.3} + D \frac{\text{energiaEletrica}}{\text{saída}} + F \quad (\text{LI, 2010})(3.1).$$

$$\text{custo} = \$1363.65 \text{ (U.S.)} \quad (\text{LI, 2010}) (3.1)$$

lucro bruto = $E \times \text{recuperação de metal} \times 0.3 - \text{custo}$ (LI, 2010) (3.2)

lucro bruto = \$256.35 (U.S) (LI, 2010)(3.2)

A incineração, por sua vez, é uma técnica que precisa ser estudada sistematicamente como empregá-la, ao realizá-la é preciso se preocupar com as emissões. Um incinerador pode funcionar sem poluição e, ainda, é possível produzir ou reaproveitar energia, desde que as tecnologias e os cuidados adequados sejam utilizados.

3.2 FLUXOS GERAIS

A utilização de aparelhos eletrônicos é crescente em todo o mundo, tanto em países desenvolvidos como em países em desenvolvimento. Embora nos países em desenvolvimento, ao mesmo tempo, o crescente desenvolvimento tecnológico na indústria levou ao crescimento quantitativo significativo e o tempo de vida útil dos aparelhos diminuiu (YU, 2009). Desta forma, nos países em desenvolvimento o crescimento do REEE é maior.

O tempo de vida útil de um produto é uma variável fundamental na compreensão dos impactos ambientais associados ao ciclo de sua vida. No entanto, o tempo de vida ativa pode ter variações significativas de uma região para outra. Outra questão que precisa ser levada em consideração é que os equipamentos podem ficar algum tempo armazenados antes de passarem a ser usados ou até mesmo ser descartado antes do real fim de vida funcional.

Por exemplo, em um estudo de LCA para computador na Europa assumiu-se que o tempo de vida para o computador seria 6,6 anos. Entretanto, computador pode ficar armazenado por um período significativo. Em 2004, por exemplo, uma pesquisa mostrou que o tempo de uso do computador *desktop* no Japão seria de três anos antes da disposição final, ou seja, revenda, eliminação e reciclagem (BABBITT et. al, 2009).

Além disso, o tratamento desses equipamentos na fase final da sua vida útil ainda é deficitário em muitas regiões do mundo. É nos países em desenvolvimento que surgem os problemas mais críticos de tratamento final de REEE.

Como o crescimento da usabilidade de eletrônicos como o computador e o celular é mais crescente nas regiões em desenvolvimento, nesse sentido, espera-se que o crescimento do REEE nos próximos anos seja grande nessas regiões. Mesmo porque nessas regiões em desenvolvimento o gerenciamento adequado de REEE é escasso. Portanto, tem imenso potencial de expansão.

É relevante conhecer a massa do computador, pois é nela que estão as propriedades que podem ser recuperadas, portanto, para a continuidade do fluxo é preciso considerá-la como um dos elementos mais importantes. Segundo Steubing et. al (2009), o peso médio do computador *desktop* é de aproximadamente 13,39 kg, do *laptop* 3,51 kg, do monitor CRT 15,87 kg e do monitor LCD 5,72 kg.

A Tabela 3.2 mostra os materiais que constituem um computador pessoal *desktop* e monitor CRT, onde a soma do peso desses materiais seriam de aproximadamente 27 kg. É possível observar que a sílica, o ferro, o plástico e o alumínio são os materiais mais abundantes em relação ao peso total composto no computador *desktop* com monitor CRT.

Tabela 3.2: Composição de um computador pessoal *desktop* e monitor CRT, ~ 27 kg, modificado de MCC (1996).

Nome do material	Conteúdo (% do peso total)	Peso do material no computador (kg)	Uso	Localização
Plástico	23	6,26	Isolamento	Cabos
Chumbo	6	1,72	Junção de metal	Funil de vidro em CRTs, PCI
Alumínio	14	3,86	Condutividade estruturais	CRT, PCI, conectores
Germânio	0,0016	< 0,1	Semicondutores	PCI
Gálio	0,0013	< 0,1	Semicondutores	PCI
Ferro	20	5,58	Estruturas magnéticas	CRTs, PCI
Estanho	1	0,27	Junção de metal	PCIs, CRTs
Cobre	7	1,91	Condutividade	CRTs, PCIs, conectores
Bário	0,03	< 0,1	-	Painel de vidro no CRT
Níquel	0,8503	0,23	Estruturas magnéticas	CRT, PCI
Zinco	2	0,6	Bateria, emissor de fósforo	PCI, CRT
Tântalo	0,0157	< 0,1	Capacitor	Capacitores / PCI,

Nome do material	Conteúdo (% do peso total)	Peso do material no computador (kg)	Uso	Localização
				fonte de alimentação
Índio	0,0016	< 0,1	Transistor, retificador	PCI
Vanádio	0,0002	< 0,1	<i>Red</i> emissor de fósforo	CRT
Térbio	-	-	<i>Green</i> ativador de fósforo, dopante	CRT, PCI
Berílio	0,0157	< 0,1	Condutividade Térmica	PCI, conectores
Ouro	0,0016	< 0,1	Conectividade, Condutividade	Conectividade / PCI, conectores
Európio	0,0002	< 0,1	Ativador de fósforo	PCI
Titânio	0,0157	< 0,1	Pigmento, agente de liga	Encaixe
Rutênio	0,0016	< 0,1	Circuito resistivo	PCI
Cobalto	0,0157	< 0,1	Estruturas magnéticas	CRT, PCI
Paládio	0,0003	< 0,1	Conectividade, Condutividade	PCI, conectores
Manganês	0,0315	< 0,1	Estrutura magnética	CRT, PCI
Prata	0,0189	< 0,1	Condutividade	Condutividade / PCI, conectores
Antinomia	0,0094	< 0,1	Díodos	PCI, CRT
Bismuto	0,0063	< 0,1	Agente <i>umectante</i> em película grossa	PCI
Crómio	0,0063	< 0,1	Decorativa, <i>Hardner</i>	Encaixe
Cádmio	0,0094	< 0,1	Bateria, azul-verde emissor de fósforo	PCI, CRT
Selênio	0,0016	0,00044	Retificadores	Retificadores /PCI
Nióbio	0,0002	< 0,1	Soldadura	Housing
Ítrio	0,0002	< 0,1	<i>Red</i> emissor de fósforo	CRT
Ródio	-	-	Condutor de filme espesso	PCI
Platina	-	-	Condutor de filme espesso	PCI
Mercúrio	0,0022	< 0,1	Baterias, interruptores	PCI
Arsênico	0,0013	< 0,1	Dopante em	PCI

Nome do material	Conteúdo (% do peso total)	Peso do material no computador (kg)	Uso	Localização
			transistores	
Sílica	24,8803	6,8	Vidro, dispositivos de estado sólido	CRT, PCI

Fonte: MCC - Valuable Substances in e-waste, 1996.

Pode-se observar que o computador e o monitor são constituídos por muitos materiais. Muitos desses materiais podem ser recuperados na fase final de sua vida útil. Segundo Jönbrink e Zackrisson (2007), uma estimativa realizada na UE em 2005 mostra as significativas proporções de materiais que poderiam ser reciclados de computador e monitor (utilizou-se da ⁶*EcoReport* para avaliar impacto desses materiais). O trabalho buscou avaliar o impacto tanto de materiais como de energia, no entanto, avaliou todo o ciclo de vida dos aparelhos. O trabalho teve como objetivo elaborar um *framework* baseado em dados e estimativas de acordo com a ferramenta. A Tabela 3.3 mostra a média do material em peso contido no computador *desktop*, *laptop*, monitor LCD e CRT. É possível observar que os materiais que podem ser reciclados na fase final de sua vida (o peso dos materiais recuperáveis estão entre parênteses), para o *desktop* do total de 12753 gramas são recicláveis 10461 gramas; para o *laptop* do total de 3779 gramas são recicláveis 2398 gramas; para o monitor LCD do total de 6808 gramas são recicláveis 4377 gramas; para o monitor CRT do total de 16397 gramas são recicláveis 13322 gramas.

De acordo com Willians (2003), a reciclagem de um computador *desktop* pode reduzir 33 Kg de CO₂ comparando a disposição em aterros – para se chegar ao resultado do trabalho foi utilizado o parâmetro *Economic Input-output LCA*.

Embora alguns estudos mostrem que o aproveitamento dos materiais reciclados possa chegar a 100%, vale ressaltar que a energia economizada na recuperação, as emissões e também o custo envolvido no processo dependem significativamente da tecnologia e da técnica utilizada.

⁶ Ferramenta utilizada para calcular o custo de operação e impacto ambiental.

Tabela 3.3: Resumo do peso de material contido e peso reciclável, dados de 2005 (JÖNBRINK e ZACKRISSON, 2007) em gramas.

Equipamento	Plástico (g)	Ferro (g)	Não-ferros (g)	Revestimento (g)	Eletrônicos (g)	Outros (g)	Peso total (g)	Percentual total reciclável (%)
PC <i>Desktop</i>	1128 (113)	6911 (6565)	987 (937)	2 (2)	1439 (672)	2287 (2172)	12753 (10461)	82
<i>Laptop</i>	852 (27)	489 (59)	235 (223)	5 (5)	914 (400)	1284 (1220)	3779 (2398)	63
Monitor <i>LCD</i>	2251 (225)	3019 (2868)	229 (217)	1 (1)	270 (79)	1038 (985)	6808 (4377)	64
Monitor <i>CRT</i>	2412 (1964)	126 (120)	236 (224)	6 (6)	341 (119)	13276 (12612)	16397 (13322)	81

Fonte: Personal Computers (desktops and laptops) and Computer Monitors Draft Final Report (Task 1-7), (JÖNBRINK e ZACKRISSON, 2007).

A economia de energia com a recuperação para produzir materiais, é bastante significativa. De acordo com Williams (2003), a recuperação do aço economiza bastante energia em um computador *desktop*, seguido pelo epóxi, alumínio e cobre e outros materiais (assim como mostra a Tabela 3.4). O total de energia economizada no computador *desktop* (desses materiais) é cerca de 765 MJ/unit. Mas a eficiência da recuperação depende dos meios utilizados.

De acordo com Williams (2003), no monitor CRT está contido materiais com grande potencial de economia energética com a recuperação, dentre eles o elemento mais significativo na economia energética (considerando a quantidade do material) é o plástico, seguido pelo aço, o vidro e o cobre – assim como ilustra a Tabela 3.5.

Tabela 3.4: Economia energética com a recuperação de materiais em um computador desktop (WILLIAMS, 2003).

Material	Economia energética por material (MJ / Kg)	Montante em gramas	Economia energética (MJ/unit)
Aço	59	6050	357
Epóxi	140	1040	146
Alumínio	214	440	94
Cobre	94	670	63
Plástico	84	650	55
Ouro	84000	0,36	30
Estanho	230	47	11
Níquel	340	18	6,2
Prata	1570	1,4	2,3
Chumbo	54	27	1,5
Outros		96	
Total		9040	765

Fonte: Energy Analysis of End-of-life Options for Personal Computers: Resell, Upgrade, Recycle (WILLIAMS, 2003).

Tabela 3.5: Economia energética com a recuperação de materiais do CRT de 17 polegadas, modificado de Williams (2003).

Material	Economia energética por material (MJ / Kg)	Montante em gramas	Economia energética (MJ/unit)
Vidro	15	6817	102
Aço	59	2830	167
Cobre	94	700	66
Ferrite	59	480	28
Alumínio	214	240	51
Plástico	84	3530	297
Resina Epóxi	140	140	20
Estanho	230	20	4,6
Chumbo	54	593	32,0
Prata	1570	1,24	1,9
Ouro	84000	0,31	26,0
Total		15350	795

Fonte: Energy Analysis of End-of-life Options for Personal Computers: Resell, Upgrade, Recycle (WILLIAMS, 2003).

Segundo Chancerel et. al (2009), a concentração de metais preciosos nas PCIs normalmente é muito maior que a concentração de metais preciosos em minérios. A concentração de ouro e paládio em minérios seria menor que 10 g/t. Comparado às concentrações de PCI de computadores pessoais de 250 g/t de ouro e de 110 g/t de paládio (conforme a Tabela 3.6), assim, a importância da recuperação de metais preciosos se torna óbvia.

Segundo Keller (2006), cerca de 2/3 do ouro contido no computador *desktop* está na placa de circuito impresso. De acordo com Streicher-Porte (2006), o computador pessoal apresenta cerca de 0,3 gramas de ouro, enquanto que na PCI, segundo Hagelüken (2006) teria cerca de 0,2 gramas. Isso mostra a importância de recursos preciosos contido nas PCIs.

Segundo Loerincik (2006), para serem manufaturados o computador e o monitor consomem-se significativa energia primária, cerca de 7042 MJ de energia não renovável; já o computador *desktop* com monitor LCD cerca de 6254 MJ e o *notebook* cerca de 3710 MJ. A parte do computador que consome mais energia primária não renovável são *chips* e *microchips*. Utilizaram-se as abordagens *LCA*, *PLCA* e *IOLCA* e na estimativa foi utilizado o *Impact 2002+ method* para se chegar a esses resultados. Pode-se observar que o monitor LCD consome menos energia primária não renovável que o CRT. Já o *notebook* consome aproximadamente 50% da energia primária não renovável do computador *desktop*, assim como mostra a Tabela 3.7.

Tabela 3.6: Média da concentração de metais preciosos nas placas de circuito impresso dos equipamentos (CHANCEREL et. al, 2009).

Referência	Equipamento (originado apenas da placa de circuito impresso)	Prata (g/t)	Ouro (g/t)	Paládio (g/t)	Platina (g/t)
Angerer et al. (1993)	Computador pessoal	905	81	-	-
Hagel Uken (2006)	Computador pessoal	1000	250	110	
Huisman et al. (2007)*	Computador pessoal	1000	230	90	
Huisman et al. (2007)*	Monitor CRT	150	9	3	
Huisman et al. (2007)*	Monitor LCD	1300	490	99	
Huisman et al. (2007)*	Impressora	350	47	9	
Legarth et al.(1995)	Computador pessoal	700	600	100	40

Fonte: Assessment of Precious Metal Flows During Preprocessing of Waste Electrical and Electronic Equipment (CHANCEREL et. al, 2009).

Tabela 3.7: Energia primária não renovável na manufatura (LOERINCIK, 2006).

Equipamento	Energia primária não renovável
<i>Desktop</i> com monitor <i>CRT</i>	7.042 MJ
<i>Desktop</i> com monitor <i>LCD</i>	6.254 MJ
<i>Notebook</i>	3.710 MJ
Partes e proporção em relação ao computador %	
<i>Chips e microchips do desktop</i>	67%
Chips e microchips do notebook	62%
PCI de <i>desktop</i>	25%
PCI de <i>notebook</i>	11%

Fonte: Environmental Impacts and Benefits of Information and Communication Technology Infrastructure and Services, using Process and Input-Output Life Cycle Assessment (LOERINCIK , 2006).

3.3 OS PAÍSES EM DESENVOLVIMENTO

A geração de REEE nos países em desenvolvimento cresce muito devido ao crescimento demográfico e o poder aquisitivo da população que está crescendo. Segundo Yu et al. (2009) computadores obsoletos nas regiões em desenvolvimento excederão aos computadores obsoletos em regiões desenvolvidas antes de 2016 ou 2018. Antes de 2030, os PC's obsoletos nas regiões em desenvolvimento alcançarão 400 a 700 milhões de unidades, longe, um número bem maior que o das regiões desenvolvidas 200 a 300 milhões de unidades.

De acordo com Manhart (2010), muitos países em desenvolvimento conseguiram construir suas próprias indústrias e os padrões de consumo passaram a sofrer uma drástica transformação. Dispositivos eletroeletrônicos são vendidos em larga escala como produtos de massa global, de forma que o REEE, ao contrário da maioria de outros tipos de substâncias perigosas tem um crescimento mais rápido.

O tempo de vida do computador diminuiu significativamente. Pode-se mencionar que os primeiros computadores possuíam uma média de utilização de 10 anos, atualmente este período é de 2 a 4,3 anos para os produtos mais inovadores (ANDRADE, 2002).

A Tabela 3.8 mostra uma estimativa média do tempo de vida de alguns aparelhos nos países em desenvolvimento. Mas esses equipamentos podem não ser utilizados em

todo tempo de vida, como por exemplo, o equipamento pode ficar armazenado antes de ser colocado no mercado ou pode ser substituído por outro equipamento com novas funcionalidades antes do fim de vida útil (UNEP, 2009).

Em particular na China, embora exista considerável reciclagem informal, ela ainda tem significativa deficiência no tratamento de REEE, a China é o segundo país do mundo que mais dispõe REEE em aterro, depois dos EUA. Já o maior volume de equipamentos reciclados está na UE, seguido pelo Japão (ZOETMAN et al., 2009).

Tabela 3.8: Estimativa média teórica de peso e tempo de vida de EEE nos países em desenvolvimento (UNEP, 2009).

Aparelho	Tempo de vida em anos	Peso (Kg)
PC + Monitor	5-8	25
Laptop	5-8	5
Impressora	5	8
Telefone Móvel	4	0.1
TV	8	30
Refrigerador	10	45

Fonte: Sustainable Innovation and Technology Transfer Industrial Sector Studies (UNEP-RECYCLING – FROM E-WASTE TO RESOURCES, 2009).

No Peru, diferente da reciclagem informal na China e na Índia, placas de circuito impresso normalmente não são recicladas internamente, mas exportadas para a Europa para reciclagem ou destinadas à China – presumivelmente – para reciclagem informal. É notável que as considerações de ordem puramente econômica faz que as placas de circuito impresso sendo exportada para a Europa para recuperação de metais preciosos, onde os padrões ambientais são rigorosos (KAHHAT et. al, 2009).

Segundo Manhart (2010), quando se compara as diferentes abordagens para a recuperação de metal, torna-se óbvio que em uma escala global, a gestão do REEE está longe de ser eficaz e voltada para questões do meio ambiente. Os movimentos transfronteiriços não só levam à deslocalização significativa de substâncias perigosas e aos impactos subsequentes sobre a saúde humana e aos problemas ao meio ambiente, como também a perdas severas de metais raros e valiosos.

Segundo Andrade (2002), no Brasil, aproximadamente 49% do lixo em geral coletado – durante o período da realização do seu estudo – era disposto em vazadouros,

sem qualquer tipo de tratamento; outros 45% eram destinados aterros controlados ou sanitários e apenas 5% recebiam tratamento em usina.

3.4 FLUXO NO BRASIL

No Brasil existe um mercado local que se baseia em pequenas cooperativas de reciclagem, algumas empresas e os remanejamentos informais de eletrônica. Entretanto, normalmente grande parte do REEE é descartada e acaba em aterros (FONSECA e MATIELO, 2009).

O CEMPRE criou um comitê especialmente voltado para acompanhar as discussões sobre a reciclagem de eletroeletrônicos no país. O comitê é integrado por empresas do setor, fabricantes ou varejistas, associados ao CEMPRE, como a Intel, HP, Dell, Phillips, Wal Mart, Carrefour e o Pão de Açúcar. O foco do grupo é debater os avanços e os principais entraves da reciclagem da categoria e trabalhar em parceria com as autoridades governamentais para inserir a questão de forma sustentável na Política Nacional de Resíduos Sólidos (CEMPRE, 2011).

Segundo relatório da (ITAUTEC, 2012), empresa multinacional Brasileira fabricante de equipamentos de tecnologia da informação, incorporou um programa de reciclagem de eletrônicos. Esta operação acontece num centro da empresa em Jundiaí, cidade do interior do Estado de São Paulo, onde está localizada a fábrica.

Neste espaço, os equipamentos são recebidos, desmontados, descaracterizados, pesados e depois têm suas partes segregadas por tipo de material. O procedimento é válido para PCs, notebooks ou equipamentos de automação. Após a separação, estes resíduos são encaminhados aos cuidados de recicladores homologados para o processamento ou destinação final.

Em 2010, o programa já atingiu o volume de 3.842 toneladas de resíduos reciclados, acréscimo de 524% em comparação com o exercício anterior. Do montante, cerca de 53,8 toneladas de placas eletrônicas foram encaminhadas à reciclagem fora do país, que ainda não possui tecnologia disponível para o processo. Os demais materiais são reciclados por empresas brasileiras.

O processo da reciclagem, os equipamentos são recebidos, classificados e depois separados com base em seus componentes principais. Como os plásticos, metais, cabos,

embalagens e componentes eletrônicos, que incluem o HD, memórias e as placas de circuitos integrados.

Após atingir uma quantidade determinada, estes materiais são acomodados em pacotes maiores, para facilitar o armazenamento e o transporte e, em seguida, são reintroduzidos no processo produtivo por meio de parceiros que utilizam estes materiais como matéria-prima.

Observe que a única exceção a esta reciclagem de materiais tecnológicos no Brasil se aplica às placas de circuito impresso. Como não existe tecnologia homologada no Brasil para extrair destas placas os metais nobres utilizados, a Itautec acumula estas placas e, de tempo em tempo, encaminha-as para parceiros em Cingapura e na Bélgica, onde elas são completamente recicladas. Assim, do total de REEE da Itautec destinado para reciclagem, aproximadamente 97% dos materiais são reciclados por empresas instaladas no Brasil. Os demais 3%, que constituem as placas de circuito impresso, vão para o exterior.

Segundo Oliveira (2010), do ponto de vista técnico, dos três estágios descritos pelo relatório do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), a Coleta (Logística Reversa); o Pré-Processamento (Desmontagem, Descaracterização e Separação) e o Processamento Final (disposição, reciclagem ou tratamento), o Brasil já têm algumas modestas iniciativas, porém muito dependentes da iniciativa privada.

O Brasil, assim como os países em desenvolvimento, tem evoluído no setor comercial de eletroeletrônicos. O país ainda tem um fator estimulante que é o alto crescimento da economia nos últimos anos. Em 2007, cerca de 20,5% dos domicílios brasileiros informaram possuir ao mesmo tempo, iluminação elétrica, telefonia fixa, computador, geladeira, TV em cores e máquina de lavar (IBGE, 2008). Esses números mostram que ainda há um grande espaço para crescimento. À medida que a população progride economicamente, a inserção de bens como eletroeletrônicos tende a aumentar.

Enquanto a economia do Brasil cresce e integra à globalização, ainda existe uma lacuna (de uma grande parcela da população) ao acesso a informação. Nesse sentido, o eletrônico ao invés de ser descartado poderia ser reaproveitado em programas de inclusão social e reciclagem (FONSECA e MATIELO, 2009). É importante observar que esse tipo de reaproveitamento apenas retarda a necessidade de recuperação e prolonga a fase de uso, na fase final da vida funcional de um equipamento, é conveniente recuperar para resgatar os recursos valiosos e preservar o meio ambiente.

Segundo Oliveira (2010), no Brasil, a nível federal, ainda não tem regulamentação em relação ao tratamento de REEE. Porém, em 2010 já foi aprovada a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, que legisla sobre disposição de resíduos, inclusive REEE. Mas é necessário avançar para a implantação de uma regulamentação específica para o tratamento de REEE.

Segundo Fonseca e Matielo (2009) no Brasil é necessário criar programas e sistematizar tratamentos adequados para os computadores no final da sua funcionalidade. A estimativa é que em 2012 haja cerca de 100 milhões de computadores em uso, cerca de 1 computador para cada 2 pessoas no país.

3.5 OS PAÍSES DESENVOLVIDOS

Entre 2001 e 2005, países como o Japão e os países membros da União Europeia (UE) introduziram o princípio de Responsabilidade Extendida ao Produtor (REP) para sistemas de recuperação de REEE. A UE em 2005 teve uma média de recuperação *per capita* em torno de 5,13 kg e superou o seu objetivo que era 4 kg, enquanto alguns países chamam a atenção individualmente como a Suécia, recuperou 12,20 kg e Reino Unido, 9,9 kg. Para o Japão esse número seria aproximadamente 3,5 kg (YOSHIDA, 2009).

A Tabela 3.9 mostra alguns exemplos em responsabilidade extendida ao produtor (REP) obrigatórias na indústria de REEE. Os países que aplicam as diretivas com cotas de recuperação, impondo uma forte restrição na decisão da disposição. A regulamentação atual é dirigida predominantemente à redução de resíduos e prevenção da poluição por meio da redução da exportação de resíduos e aumentando a recuperação de materiais. As cotas são atualmente realizadas por meio da realização de recuperação de materiais, assim como a economia de energia na produção de materiais (ZOETEMAN et al., 2009).

No entanto, tanto o Japão como a UE apresenta sérios problemas com a disposição de REEE para outros países. Por exemplo, no Japão a estatística revela que para CRT usada, foram exportadas em 2008 cerca de 2.244.356 unidades. Os principais países que importaram foram o Vietnã com 773.496 unidades, Macau 564.803 unidades, a Filipinas com 461.603 unidades e China 195.628 unidades (YOSHIDA, 2009).

O total do índice de computador por habitante nos países desenvolvidos é alto, por exemplo, nos EUA, em 2006 havia uma média de 80 computadores por 100 habitantes (KAHHAT e WILLIAMS, 2008).

Tabela 3.9: Quota de recuperação em algumas regiões do mundo (ZOETEMAN et al., 2009).

	Opções ⁷	UE	Japão	Coréia
REEE	Recuperação em eletroeletrônico da Linha branca	80%	50%	85%
	Recuperação em eletroeletrônico da Linha Marron	75%	55%	80%

Fonte: Handling WEEE waste flows: on the effectiveness of producer responsibility in a globalizing world (ZOETEMAN et al., 2009).

Entretanto provavelmente, o número de computador por habitante nos países desenvolvidos venha a se estabilizar ou crescer muito pouco, isso se deve ao fato de não haver a necessidade das pessoas adquirirem novos equipamentos, uma vez que quase todas já têm o seu computador. Ainda pode-se considerar que a taxa de crescimento populacional é mínima ou até negativa. Isso significa que, presumivelmente, o número de computador por habitante nos países desenvolvidos poderá se estabilizar.

Já o tratamento do REEE nos países desenvolvidos, principalmente os europeus e o Japão, é mais bem estruturado. Embora exista o problema do fluxo de REEE entre esses países e os países em desenvolvimento. Ainda que exista a legislação proibindo o fluxo transfronteiriço, a comercialização informal e ilegal ainda acontece.

3.6 CARACTERIZAÇÃO GERAL: MASSA X ENERGIA X ECONOMIA

A alta dos preços dos recursos proporcionará oportunidades únicas para introduzir formas mais sustentáveis de gestão de REEE no mundo. O valor do material permite que as empresas de recuperação lucrem em períodos de alta nos preços dos produtos. Este é, especialmente, o caso da composição do REEE, além do aço, do cobre e das concentrações de alumínio e de metais preciosos que representam um valor muito significativo – tais como paládio, ouro e prata (MANHART, 2010).

Segundo Hagelüken (2008), os metais preciosos estão contidos, principalmente, nas placas de circuito impresso (PCIs) de dispositivos eletrônicos, como computadores, TV's,

⁷ As definições variam, entretanto, “mercadoria branca” são geralmente funcionais domésticas (lavanderia e equipamentos de cozinha), “linha marrom” são de lazer relacionados a áudio e TV.

DVD *players* e celulares. A este respeito, é de especial importância considerar que as PCIs também contém as maiores concentrações de substâncias perigosas de todas as frações do REEE.

De acordo com os testes na caracterização da toxicidade dos resíduos sólidos, os REEE de CRT's foram declarados "perigosos" e devem ser banidos de incineração e aterro na maioria dos países desenvolvidos. Atualmente, grande quantidades de REEE de CRT's são geradas em nível mundial, sendo que apenas alguns países desenvolvidos têm programas eficazes de retorno (de equipamentos no final de sua vida útil) e de boa gestão (NNOROM et al., 2011).

Por outro lado, a extração de materiais primários para a manufatura de computadores consome significativa energia. A União Europeia realizou um estudo em 1998 e mostrou que são gastos cerca de 3.630 MJ de energia e 2.600.000 Kg de água para um computador *desktop* com monitor (WILLIAMS, 2004).

Os resultados da análise de processos e dados representativos apontados por Williams (2004) estão resumidos e contidos na Tabela 3.10. Os valores apresentados representam uma média ponderada que está empregada para representar a indústria global. Essa análise foi baseada em avaliação híbrida que combina os processos e os métodos *input-output* e *process-sum analysis*. As atividades do *process-sum analysis* são as seguintes:

- 1) Fabricação de semicondutores;
- 2) Manufatura de placas de circuito impressa;
- 3) Manufatura do monitor CRT;
- 4) Produção de silício e carvão;
- 5) Produção de outros materiais em computadores e monitores como aço, plástico, alumínio e vidro, etc.
- 6) *Design*, montagem dos componentes e *marketing*.

A Tabela 3.11, por sua vez, mostra valores de eletricidade, energia fóssil e total de energia usada para manufaturar o computador *desktop* com monitor CRT de 17 polegadas. Pode-se observar que o total de energia para produção do computador *desktop* com monitor CRT é cerca de 7320 MJ, total de energia fóssil cerca de 4040 MJ e o total de eletricidade cerca de 477 kWh. Esses valores de energia aplicada na manufatura do computador servem de base para avaliar o potencial da re-manufatura, ou seja, manufatura por meio de materiais secundários.

Tabela 3.10: Resumo da análise e soma energética para produzir o computador desktop utilizando *process-sum analysis* (modificado de WILLIAMS, 2004).

Processo e fonte de dados	Energia por unidade	Energia por desktop (MJ)
Semicondutores	8,2 MJ/cm ²	910
Placa de circuito impresso	240 MJ/m ²	64
Fabricação	220 MJ/unidade	220
Pastilhas de silício	7560 MJ/kg	140
Materiais plásticos (aço, vidro, etc)	85 MJ/kg (avg.)	1560
Montagem / manufatura	340 MJ/unidade	340
Total por <i>desktop</i>		3230

Fonte: Revisiting energy used to manufacture a desktop computer: hybrid analysis combining process and economic input-output methods (WILLIAMS, 2004).

Tabela 3.11: Energia usada na manufatura do *desktop* com monitor CRT de 17 polegadas (WILLIAMS, 2004).

Item	Eletricidade (kWh)	<i>Direct Fossil (MJ)</i>	Total energia (MJ)
<i>Process analysis</i>			
Semicondutores	170	298	910
Placas de circuito	10,3	26,7	64
Manufatura / montagem do CRT	12,5	210	255
Outros materiais do <i>desktop</i>	n/a	n/a	765
Outros materiais do monitor CRT	n/a	n/a	795
Silício	38	n/a	140
Montagem do <i>desktop</i>	51	35	220
<i>Additive IO</i>			
<i>Elect. materials / chem.</i>	32	338	450
Semicondutores	31	360	470
<i>Passive components</i>	9,1	127	160
Restante do valor IO			
Outras partes: drives, CD-ROM, etc.	16	273	330
Transporte	3,8	459	473
Outros processos	105	1920	2300
Total na produção	477	4040	7320

Fonte: Revisiting energy used to manufacture a desktop computer: hybrid analysis combining process and economic input-output methods (WILLIAMS, 2004).

Segundo Andrade (2002), a placa de circuito impresso é uma das partes do computador que contém a parte mais significativa de materiais – assim como mostra a Tabela 3.12. Esses materiais detêm significativo valor energético e podem ser reaproveitados.

Tabela 3.12: Composição das placas de circuito impresso (ANDRADE, 2002).

Composição	%	
Materiais cerâmicos, vidros e óxidos	Sílica	15
	Alumínio	6
	Óxidos Alcalinos e Alcalinos terrosos	6
	Outros óxidos	3
Plásticos	Polímeros (polietileno, polipropileno, poliésteres e policarbonatos)	26
	Plásticos halogenados	4
Metais	Metais bases (Cu, Fe, Sn, Ni, Al, Pb, Zn e outros)	39,5
	Metais preciosos (Ag, Au e Pd)	0,5

Fonte: Caracterização e Classificação de Placas de Circuito Impresso de Computadores como Resíduos Sólidos (ANDRADE, 2002).

De acordo com Williams (2010), a reciclagem de placas de circuito impresso tem sido valorizada pelo conteúdo de metais preciosos e outros que apresentam potencial para a recuperação e venda nos mercados de metais. A Tabela 3.13 mostra que o ouro, o paládio e a prata estão presentes em concentrações significativas nas placas de circuito impresso com concentrações de até 0,1% em peso para o ouro, paládio 0,03% e prata 0,3%. Estes três metais preciosos representam cerca de 80 e 90% do valor intrínseco das PCIs. O cobre também está presente em altas concentrações, tem um valor menor, mas ainda representa aproximadamente 10% do valor intrínseco da placa de circuito impresso. Além disso, estão contidos materiais perigosos que podem ter um impacto significativo no ambiente, por exemplo, o níquel, o chumbo e o antimônio. Outros estudos também identificaram a presença de cádmio, arsênio, cromo e mercúrio em placas de circuito impresso (HALL e WILLIAMS, 2002). Os materiais cerâmicos utilizados em placas de circuito impresso são principalmente de sílica ou alumínio, mas, óxidos terrosos, mica de titanato de bário também têm sido utilizados. O material cerâmico é reforçado com fibra de vidro ou outro reforço de enchimento.

Tabela 3.13: Representação dos materiais compostos na placa de circuito impresso (WILLIAMS, 2010).

Material	Composição (%)
Metais (normalmente 40%)	
Cu	10-26,8
Al	1,33-4,78
Pb	0,99-4,19
Zn	0,16-2,17
Ni	0,28-2,35
Fe	1,22-8,0
Sn	1,0-5,28
Sb	0,06-0,4
Au	80-1000 (ppm)
Pt	4,6-30 (ppm)
Ag	110-3301 (ppm)
Pd	10-294 (ppm)
Cerâmica (normalmente 30% do peso)	
SiO ₂	15-41,86
Al ₂ O ₃	6-6,97
Alcalinas e óxidos alcalino-terrosos	6-9,95 ^a
Titanato, mica, etc.	3
Plástico (normalmente 30%)	
Polietileno	9,9-16
Polipropileno	4,8
Poliésteres	4,8
Epóxi	4,8
Policloreto de vinilo	2,4
<i>Fluoroethane Polytetra</i>	2,4
Nylon	0,9

Fonte: How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes (WILLIAMS, 2010).

A Figura 3.2 apresenta a distribuição do valor econômico por metal, de placas (do tipo *motherboard* com 0,5 kg de peso), pobre e rica, respectivamente. Como a diferença econômica entre esses dois tipos de placas se dá apenas devido ao teor (percentual em relação ao peso) dos metais nobres são visíveis unicamente as alterações nos valores do ouro, da prata, do paládio e da platina. Na placa rica (maior proporção e materiais preciosos), de valor total estimado em R\$ 11,00 o valor em ouro contido é cerca de R\$

6,57, seguindo-se o cobre e o paládio (132 e 118,25 centavos, respectivamente). Quanto à placa pobre, cujo valor total foi estimado em R\$ 2,61, destaca-se o valor contido do cobre R\$ 1,32, o ouro valendo cerca de 41,25 centavos, o níquel 24,75 centavos e o estanho 22 centavos. O processo base utilizado no trabalho foi o processo de reciclagem por via pirometalúrgica (ABRANTES, 2009). É notável que para recuperação de cobre, o valor não altera entre a placa rica e a pobre, portanto, é um metal interessante a ser recuperado independente do tipo da placa de circuito impresso. Os valores foram convertidos de EURO para REAL-BRASIL na data 01/06/2009 e apresentados como centavos, ou seja, 1 € equivale a R\$ 2,75 (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2012).

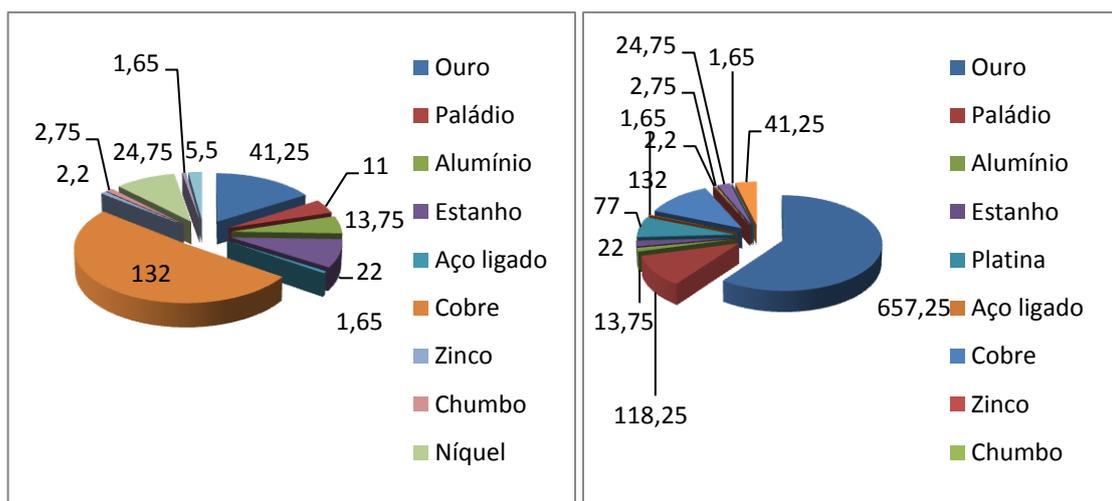


Figura 3.2: Valor econômico contido numa PCI - valores em centavos (ABRANTES, 2009).

PCI pobre = R\$ 2,61;

b) PCI rica = R\$ 11,00.

Veit (2005) investigou a reciclagem de cobre nas placas de circuito impresso. O autor descreveu que a quantidade de metal encontrado nas Placas de Circuito Impresso é bastante significativa e comparou a quantidade de cada metal encontrado em PCI de acordo com análises químicas e a quantidade de metal encontrado nos minérios. Essa comparação está ilustrada na Tabela 3.14. Pode-se observar que o percentual mais significativo contido nas PCIs em relação ao percentual no minério é o cobre, estanho e o ouro, enquanto o minério teria cerca de 0,5% a 3,0% na PCI teria aproximadamente 21,19% de cobre, de estanho teria cerca de 3,17% e no minério cerca de 0,2-0,85 e para o ouro enquanto na PCI tem cerca de 10 ppm no minério aparece com cerca de 6 – 12 ppm.

Tabela 3.14: Percentagem de metal encontrado em média nos minérios e nas placas de circuito impresso (VEIT, 2005).

Elemento	% no minério	% média na PCI
Cobre	0,5 – 3,0	21,19
Ouro	6 – 12 ppm	10 ppm
Estanho	0,2 – 0,85	3,17
Alumínio	51 – 64	1,79
Ferro	30 – 60	1,31
Chumbo	0,3 – 7,5	1,20
Zinco	1,7 – 6,4	0,17
Níquel	0,7 – 2,0	0,17

Fonte: Reciclagem de Cobre de Sucatas de Placas de Circuito Impresso (VEIT, 2005).

Para Veit (2005), as fontes naturais desses metais têm em média 1% de metal e 60% do custo para extração do minério se dá devido à larva e, pode-se dizer que o custo de extração e concentração para a produção primária é provavelmente muito maior que o custo para tratamento de PCI.

Em seu trabalho, Veit (2005) fez a estimativa de custo operacional restrito ao processo (energia e reagentes) da reciclagem das sucatas de placas de circuito impresso, sem considerar custo de coleta, transporte, funcionários, instalações e equipamentos, pois todos os equipamentos utilizados estavam em escala laboratorial. Além disso, não foi incluído o custo da separação magnética, pois após a análise dos resultados obtidos, foi possível concluir que a separação magnética é dispensável, assim como ilustra a Tabela 3.15.

Assim como mostram os dados contidos na Tabela 3.15, no que diz respeito ao custo energético dos vários equipamentos utilizados na reciclagem de PCI, o que apresenta maior valor é o moinho de facas que faz a cominuição mais fina (Moinho de Facas *Retsch*), embora este valor se refira ao processamento de uma tonelada e o valor do custo de energia na eletro-obtenção seja calculado para 53 kg, pois a massa restante já foi separada nos processos anteriores (VEIT, 2005).

Tabela 3.15: Estimativa de custo energético dos equipamentos utilizados na reciclagem de PCI (VEIT, 2005).

Cominuição e Separação Granulométrica					
Equipamento	Potência	Capacidade Processamento	R\$/Hora	Tempo (h)/Tonelada	Total (R\$) / Tonelada
Moinho de Facas <i>Rone</i>	5HP	20 Kg/hora	1,56	50	78,00
Moinho de Facas <i>Retsch</i>	2HP	5 Kg/hora	0,62	200	124,00
Separador Granulométrico	300W	5 Kg/hora	0,12	200	24,00
Separador Eletrostático					
Separador <i>Equimag ES1010</i>	650W	20 kg/hora	0,27	50	13,50
Eletro-obtenção				Tempo (h) /53kg	
Fonte de tensão	127W	1 kg/hora	0,41	53	22,00
					261,50
1kwh = R\$ 0,41 – CEEE (Dez 2004)					

Fonte: Reciclagem de Cobre de Sucatas de Placas de Circuito Impresso (VEIT, 2005).

A Tabela 3.16 apresenta o custo do ácido sulfúrico usado na dissolução das amostras sólidas separadas eletrostaticamente, vale ressaltar que é possível reciclar o ácido inúmeras vezes, ou seja, este custo deve ser diluído de acordo com o tempo em que permanecer em uso. A quantidade de ácido sulfúrico necessário inicialmente (120 litros) foi estimada levando em consideração que de 1 tonelada de sucata, apenas uma fração, cerca de 16% ou 160 kg será realmente dissolvida e enviadas para eletro-obtenção.

Tabela 3.16: Estimativa de custo do ácido sulfúrico usado na dissolução das amostras enviadas para a eletro-obtenção (VEIT, 2005).

Dissolução			Total
	Litros / 160 kg	R\$ / litro	Total (R\$)
Ácido Sulfúrico	120	8,00	960,00

Fonte: Reciclagem de Cobre de Sucatas de Placas de Circuito Impresso (VEIT, 2005).

Considerando-se que de uma tonelada de PCI é possível recuperar por meio do processamento mecânico e eletro-obtenção cerca de 25% do cobre presente, ou seja, 53 kg e, levando em conta o custo da energia gasta, cerca de R\$ 261,00. Assim, para se obter uma tonelada de cobre a partir de sucata eletrônica há um custo de cerca de R\$ 4.900,00 para a sequência de processos utilizados no trabalho. Quando Veit (2005) realizou o seu trabalho, o custo da tonelada de cobre no mercado estava em torno de US\$ 3.000,00 ou R\$ 8.220,00 (VEIT, 2005).

O custo da recuperação secundária pode ser bastante viável economicamente, por exemplo, conforme mostraram as estatísticas Ravi (2011), na reciclagem de plástico utiliza 70-75% menos energia que utilizando o minério primário. Já a reciclagem de alumínio requer 95% menos energia que a mineração de bauxita e a reciclagem de vidro economiza menos de 21% de energia que a produção primária.

Por outro lado, durante o ano de 2004, os preços das *commodities* começaram a crescer em nível nunca antes esperado, uma tendência que se manteve até a crise do banco no segundo semestre de 2008. Dentro de apenas 4 anos os preços dos metais como índio, antimônio, estanho, cobre, prata, cobalto e ouro subiram entre 91% e 368% (veja Tabela 3.17).

Conforme a Tabela 3.17 o aumento dos valores de alguns elementos chamam bastante a atenção: o preço do índio subiu 368% no período, o cobre 285% e a prata 250%.

Segundo Manhart (2010), a alta dos preços dos recursos proporcionam oportunidades únicas para introduzir formas mais sustentáveis de gestão de REEE no mundo. O valor do material permite que as empresas de reciclagem lucrem em períodos de altos preços dos recursos. Isto é, especialmente, o caso da composição do REEE, além do aço, cobre e das concentrações de alumínio, os metais preciosos representam os valores mais significativos entre os metais, tais como paládio, ouro e prata. Como ilustrado pela composição do material de um PC *desktop* (Tabela 3.18) esses metais podem tornar-se mais da metade do valor total do material de produtos eletrônicos. Pode-se observar que a soma dos valores do material contido no computador ultrapassou o dobro em apenas quatro anos. O ouro é o material absolutamente mais caro contido em um computador chegando a US\$ 5,82. Considerando que esses valores se referem apenas à quantidade de material encontrado em um PC comum e que cada computador tem um monitor que também contém materiais valiosos.

Tabela 3.17: Evolução dos preços de certos metais e suas aplicações em equipamentos eletroeletrônicos⁸ (MANHART, 2010).

Metal	Média de preço 2003 (US\$ / t)	Média de preço 2007 (US\$ / t)	Média de aumento do preço 2003–2007 (%)	Demanda para uso de EEE em relação à produção primária em 2006 (%)
Índio	170.000	795.000	368	79
Cobre	1.879	7.231	285	30
Prata	157.000	550.000	250	30
Cobalto	20.600	54.600	165	19
Estanho	7.490	19.800	164	33
Antimônio	2.370	5.660	139	50
Ouro	11.700.000	22.400.000	91	12

Fonte: International Cooperation for Metal Recycling From Waste Electrical and Electronic Equipment (MANHART, 2010).

A Tabela 3.19 mostra os preços de materiais recicláveis encontrados em um computador *desktop* em 2006 e 2007. Os valores dos metais são bastante significativos, US\$ 16 e US\$ 18, respectivamente. A ascensão do valor dos materiais também é significativa, US\$ 2 em apenas 1 ano. Pode-se observar que os valores se referem apenas ao conjunto de material do PC *desktop*, não estão incluídos o monitor e os periféricos.

A Tabela 3.20 mostra o potencial da mitigação de emissões com a reciclagem de metais preciosos contido no computador *desktop*. A diferença de emissão entre a produção secundária e a produção primária é grande, ou seja, a recuperação dos materiais do computador contribui para diminuir as emissões. A mitigação seria aproximadamente 0,16 kg de CO₂ para Ag; 4,21 kg CO₂ para o Au; 1,01 kg CO₂ para o Pd.

⁸ Todos os valores em dólares são corrigidos pela inflação; EUA \$ / t = dólares dos EUA por tonelada; EEE = equipamentos eletroeletrônicos; LCD = tela de cristal líquido; LED = diodos emissores de luz; CRT = tubo de raios catódicos.

Tabela 3.18: Conteúdo do material, valor médio de um PC comum sem monitor e periféricos e preços dos recursos em 2003 e 2007⁹ (GMÜNDER, 2007) e (MANHART, 2010).

Material	Quantidade contida no desktop PC (g / unidade)	Média de preços de material em 2003 (US\$/t)	Média de preços em 2007 (US\$/t)	Valor de material em 2003 (US\$/unit)	Valor de material em 2007 (US\$/unit)
Aço	6737,501	121 ^a	253 ^a	0,82	1,70
Plástico	1579,545	234 ^b	310 ^b	0,37	0,49
Alumínio	550,212	1.500	2.700	0,83	1,49
Cobre	413,225	1.879	7.231	0,78	2,99
Zinco	25,940	896	3.400	0,02	0,09
Estanho	19,573	7.490	19.800	0,15	0,39
Antimônio	18,577	2.370	5.660	0,04	0,11
Níquel	12,700	9.630	37.200	0,12	0,47
Chumbo	6,585	965	2.730	0,01	0,02
Prata	1,702	157.000	550.000	0,27	0,94
Ouro	0,260	11.700.000	22.400.000	3,04	5,82
Paládio	0,120	6.526.602	11.488.748	0,78	1,38
Crômio	0,015	922	2010	0,00	0,00
Cerâmica e outros	371,909	-	-	-	-
Soma				7,22	15,88

Fonte: International Cooperation for Metal Recycling From Waste Electrical and Electronic Equipment (MANHART, 2010).

^aOs preços para sucata de ferro e aço.

^bOs preços de plásticos mistos.

Quando o chumbo é disposto no solo, aumenta seu pH em cerca de 0,2 unidades e reduz a concentração de íons NH₂. Assim contamina o ambiente, o que pode provocar problemas aos humanos, como por exemplo, aumento da agressividade e diminuição do quociente de inteligência (QI) (Castro, Silva, Vieira, 2007).

Segundo Nnorom et al. (2011), tubos de raios catódicos (CRTs), utilizados como tela para monitores de computadores e televisores, que contêm grande quantidade de

⁹ Todos os valores em dólares são corrigidos pela inflação, até 2007. g / unidade = gramas por unidade; EUA \$ / t = dólares EUA por tonelada.

chumbo, entre 0,5 a 4 kg, dependendo do tamanho da CRT, tem sido identificado como o mais poluente de todos os componentes do REEE.

Tabela 3.19: Total de peso e valor de materiais recicláveis com o valor encontrado em um computador desktop em 2006 e 2007 (WILLIAMS, 2009).

Material	Peso kg	preço médio por material / 2006 parte (US\$/kg / kg)	preço médio por material / parte 2007 (US\$/kg)	valor econômico 2006 (US\$)	valor econômico 2007 (US\$)
Alumínio	0,44	2,57	2,64	1,13	1,16
Cobre	0,67	6,72	7,12	4,50	4,77
Ouro	0,00025	19400	22400	4,88	5,64
Chumbo	0,027	1,30	2,60	0,04	0,07
Níquel	0,02	24	37	0,44	0,68
Paládio	0,00011	10,382	11,489	1,15	1,27
Plásticos	0,65	0,25	0,25	0,16	0,16
Prata	0,001	370	430	0,37	0,43
Aço	6,12	0,44	0,52	2,72	3,19
Estanho	0,05	9	15	0,42	0,71
Soma				16	18

Fonte: Evolution of Product Lifespan and Implications for Environmental Assessment and Management: A Case Study of Personal Computers In Higher Education (WILLIAMS 2009).

Tabela 3.20: Potencial de mitigação de emissões com reciclagem de metais preciosos do PC desktop (GMUENDER et al., 2007 e MANHART, 2010).

Emissão produção primária / secundária	Ag	Au	Pd
Emissões durante a produção primária [kg CO ₂ eq/desktop PC]	0,18	4,42	1,06
Emissões durante a produção secundária [kg CO ₂ eq/desktop PC]	0,02	0,21	0,05
Mitigação em potencial com produção secundária [kg CO ₂ eq/desktop PC]	0,16	4,21	1,01

Fonte: STREICHER-PORTE M., HELLWEG S. RECYCLING - FROM WASTE TO RESOURCE Assessment of optimal manual dismantling depth of a desktop PC in China based on eco-efficiency calculations (GMUENDER et al.); International Cooperation for Metal Recycling From Waste Electrical and Electronic Equipment (MANHART, 2010).

A Tabela 3.21 mostra substâncias valiosas e perigosas contidas no computador que podem ser recuperadas, como por exemplo, chumbo e arsênio. Na fase de operação essas substâncias estão embutidas dentro do equipamento e separadas do usuário, mas quando exposta podem provocar sérios problemas.

Tabela 3.21: Metais perigosos e valiosos contido no computador desktop e monitor CRT (WILLIAMS et. al, 2008).

Elemento	Montante por unidade: computador desktop e monitor CRT em (g)	CERCLA classificação de prioridade das substâncias perigosas (2007) ¹⁰
Alumínio	680 – 960	187
Antimônio	2,4 – 17,5	219
Arsênico	0,06	1
Bismuto	0,23	não incluído
Cádmio	3,28	7
Crómio	0,05	77
Cobre	1370 – 2640	128
Ouro	0,39 – 0,67	não incluído
Índio	0,04	não incluído
Aço	7300 – 8880	não incluído
Chumbo	620 – 1373	2
Níquel	4,5 – 30	53
Platina	0,092	não incluído
Prata	0,86 – 2,64	214
Estanho	67	não incluído
Zinco	21	74

Fonte: Sustainability review of the international reverse chain for reuse and recycling of computers (WILLIAMS, 2008).

De acordo com Leite (2009), o índio, um subproduto da mineração do zinco, é essencial na fabricação dos monitores de LCD e de telefones celulares. Seu preço aumentou seis vezes nos últimos cinco anos, tornando-o mais caro do que a prata. Sua produção depende do zinco, logo, não é possível produzir mais, pois as reservas minerais são limitadas. Já se realizam reciclagens do metal índio na Bélgica, Japão e EUA, sendo que o Japão consegue retirar metade de suas necessidades anuais do elemento com a reciclagem.

¹⁰ A lista foi desenvolvida pelo *Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act (CERCLA)*. Foi considerado um total de 275 substâncias para representar a maior ameaça potencial à saúde humana, utilizando um algoritmo de classificação que considera a frequência de ocorrência, toxicidade e potencial de exposição humana.

A Figura 3.3 mostra o resumo da composição média de computadores, observe que nas placas eletrônicas apesar de representar o menor percentual, contém substâncias muito interessantes economicamente por serem valiosas.

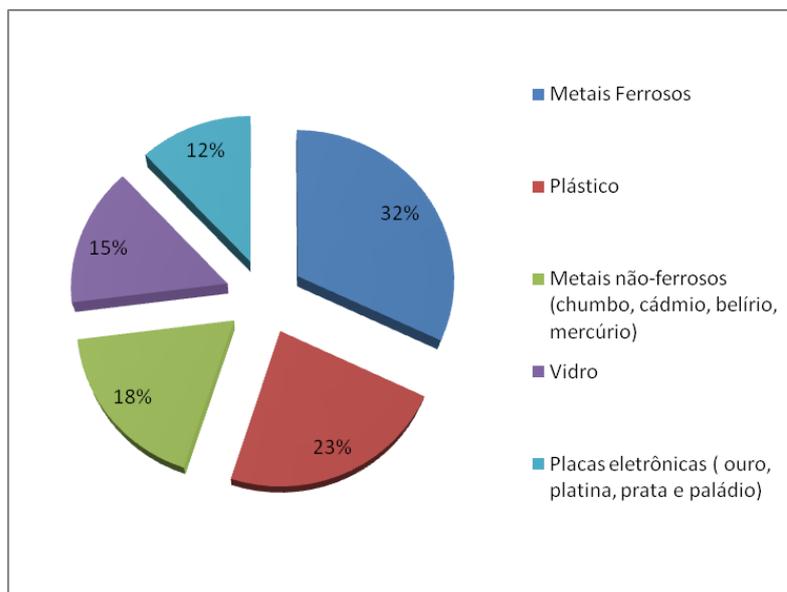


Figura 3.3: Materiais na composição do computador (PNUAM, 2007 e LEITE et. al - Fatores da logística reversa que influem no reaproveitamento do “lixo eletrônico” um estudo no setor de informática, 2009).

Na Tabela 3.22 com base em Silva et. al (2008), são apresentados os metais pesados, assim como as respectivas partes onde são encontrados, bem como a porcentagem desses metais no computador e a porcentagem que pode ser reciclada. Pode-se observar que muitos materiais têm percentual reciclável muito significativo, como por exemplo, o ouro, a prata e o cobre que detém um percentual reciclável de 99%, 98% e 90%, respectivamente. Embora outros materiais como bário, berílio e cádmio não sejam recicláveis. No que diz respeito ao chumbo, apesar de estar contido no computador, apenas 5% é reciclável.

Segundo Veit (2005), uma vantagem interessante da reutilização de sucatas está na economia de energia (assim como mostra a Tabela 3.23), materiais secundárias, recuperadas de sucatas ou resíduos, são muitas vezes mais concentrados e puros do que a matéria prima primária. A matéria prima secundária geralmente já foi processada e precisa somente de uma purificação. No processo primário da produção de metais, o metal é obtido através da redução do minério com elevado consumo de energia. No processo secundário,

o metal é obtido basicamente da fusão da sucata, em estado metálico e o consumo de energia é muito menor.

Tabela 3.22: Metais pesados, parte do computador onde é encontrada porcentagem desses metais no computador e o percentual reciclável (SILVA et. al 2008).

Metal Pesado	Parte do computador onde é encontrado	Porcentagem no computador	Porcentagem reciclável
Alumínio	Estrutura, conexões	14,1723%	80,0000%
Bário	Válvula eletrônica	0,0315%	0,0000%
Berílio	Condutivo térmico, conectores	0,0157%	0,0000%
Cádmio	Bateria, chip, semicondutor, estabilizadores	0,00994%	0,0000%
Chumbo	Circuito integrado, soldas, bateria	6,2988%	5,0000%
Cobalto	Estrutura	0,0157%	85,0000%
Cobre	Condutivo	6,9287%	90,0000%
Cromo	Decoração, proteção contra corrosão	0,0063%	0,0000%
Estanho	Circuito integrado	1,0078%	70,0000%
Ferro	Estruturas, encaixe	20,4712%	80,0000%
Gálio	Semicondutor	0,0013%	0,0000%
Germânio	Semicondutor	0,0016%	60,0000%
Índio	Transistor, retificador	0,0016%	60,0000%
Manganês	Estrutura, encaixes	0,0315%	0,0000%
Mercúrio	Bateria, ligamentos, termostatos, sensores	0,0022%	0,0000%
Níquel	Estrutura, encaixes	0,8503%	80,0000%
Ouro	Conexão, condutivo	0,0016%	99,0000%
Prata	Condutivo	0,0189	98,0000%
Sílica	Vidro	24,8803%	0,0000%
Tântalo	Condensador	0,0157%	0,0000%
Titânio	Pigmentos	0,0157%	0,0000%
Vanádio	Emissor de fósforo vermelho	0,0002	0,0000%
Zinco	Bateria	2,2046%	60,0000%

Fonte: RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS NO BRASIL (SILVA et. al 2008).

Tabela 3.23: Consumo de energia na produção primária e secundária de metais em GJ / tonelada de metal (VEIT, 2005).

Metal	Produção primária	Produção Secundária	Economia (%)
Magnésio	372	10	97
Alumínio	253	13	95
Níquel	150	16	89
Cobre	116	19	83
Zinco	68	19	72
Aço	33	14	57
Chumbo	28	10	64

Fonte: Reciclagem de Cobre de Sucatas de Placas de Circuito Impresso (VEIT, 2005).

O que se tem observado, tanto no Brasil como em outras partes do mundo, é que o mercado de computadores vem apresentando um crescimento espantoso, gerando resíduos tecnológicos que se tornam obsoletos rapidamente (ANDRADE, 2002).

Segundo Yu (2009), o quantitativo de PC's obsoletos gerados nos países em desenvolvimento vai exceder ao número dos PC's obsoletos dos países desenvolvidos no futuro próximo, entre 2016 e 2018. Antes de 2030, os números de PC's obsoletos em regiões em desenvolvimento dobrarão os de regiões desenvolvidas, com 400.700 milhões de unidades em regiões em desenvolvimento e 200.300 milhões de unidades em regiões desenvolvidas.

Entretanto, segundo Manhart (2010), a recuperação de metais preciosos requer tecnologias sofisticadas que estão disponíveis apenas em algumas regiões do mundo. A disposição mal gerenciada é a principal característica dos países em desenvolvimento em relação ao tratamento de REEE. Nessas regiões, geralmente, o REEE é visto como a principal fonte de peças de reposição para a indústria da remanufatura de EEE. Nesses países essas atividades são realizadas por pessoas físicas (por exemplo, na África do Sul, Quênia, Uganda, Marrocos, Senegal, Peru) e países como a Índia e a China revelam um grande setor informal organizado (UNEP, 2009).

A cadeia de recuperação segue as regras do mercado e é bastante flexível em relação à legislação e à gestão. Os incentivos para recuperar mais material com o menor custo é o principal motivo para a formação desse setor informal em grande escala nos países em desenvolvimento (UNEP, 2009).

Na América Latina cerca de 120.000 toneladas de resíduos de computadores precisam ser eliminadas todos os anos, quantidade esta, que estimam-se que pode triplicar até 2015.

Segundo Boeni (2008), a América Latina está passando por um rápido aumento nas vendas de computadores. A utilização de equipamento eletrônico em alguns países está se aproximando dos países industrializados. A recuperação formal de REEE na América Latina é, atualmente, uma atividade emergente. Em vários países como Chile, Argentina, Peru, Colômbia e Brasil, empresas descobriram o potencial da recuperação de metal.

3.7 AVALIAÇÃO DE MASSA *VERSUS* ENERGIA *VERSUS* ECONOMIA

O fluxograma da Figura 3.4 foi elaborado com objetivo de dar uma melhor visibilidade das etapas ideais que o computador deve seguir em seu ciclo de vida. O modelo proposto é uma ilustração que visa à aplicação de políticas, tecnologias e técnicas com o intuito de melhorar o tratamento e aproveitamento do material contido no REEE do Distrito Federal, assim como economizar energia na produção de material. Pode-se observar que apenas o resíduo não passível de reutilização deveria ser exposto em um local, que também deve ser adequado:

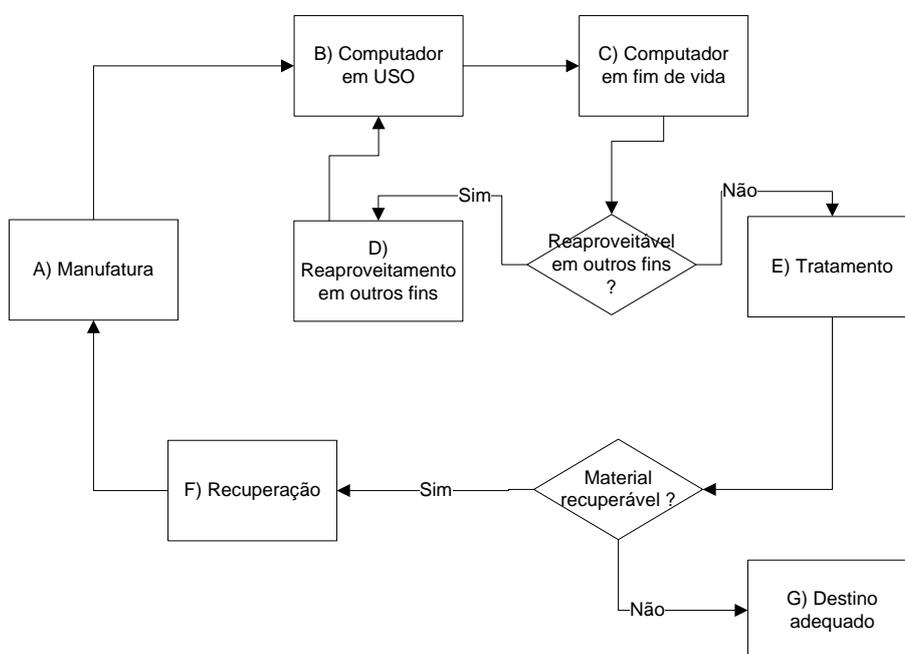


Figura 3.4: Fluxo ideal para o tratamento do computador no final de sua vida útil.

3.7.1 Computador *desktop*

Segundo Williams (2003), em um computador *desktop* há materiais que são significativamente recuperáveis, assim, significativa energia pode ser economizada (cerca de 440 g de alumínio e 94 MJ de energia economizada) 18 gramas de níquel e 6,2 MJ de energia economizada, 670 g de cobre e 63 MJ de energia economizada, 6050 g de aço e 357 MJ de energia economizada e 27 g de chumbo e 1,5 MJ de energia economizada. Totalizando 7205 g desses cinco materiais e 521,7 MJ de energia economizada, conforme Tabela 3.24.

Williams (2009) descreveu o valor monetário desses materiais contidos e recuperáveis: alumínio US\$ 1,16, níquel US\$ 0,68, cobre US\$ 4,77, aço US\$ 3,19 e chumbo US\$ 0,07. Totalizando a soma desses materiais o valor de US\$ 9,87, assim como mostra a Tabela 3.24.

Segundo Veit (2005), a economia de energia com a produção secundária de alumínio é de 95%, de níquel 89%, cobre 83%, aço 57%, chumbo 64%, conforme indica Tabela 3.24. A produção secundária desses cinco elementos representa uma economia energética de 77,6% em relação à produção primária.

Tabela 3.24: Massa \times economia de energia \times valor em alguns elementos do computador *desktop* que podem ser recuperados modificado de ^aWillians, 2003; ^bWillians, 2009; ^cVeit, 2005.

Elemento	^a Economia de Energia (MJ)	^a Massa (g)	^b Valor em 2007 (US\$/unidade)	^c PP (GJ/)	^c PS (GJ)	^c EPS (%)
Alumínio	94	440	1,16	253	13	95
Níquel	6,2	18	0,68	150	16	89
Cobre	63	670	4,77	116	19	83
Aço	357	6050	3,19	33	14	57
Chumbo	1,5	27	0,07	28	10	64
Total	521,7	7205	9,87	580	72	77,6

Fonte: Energy Analysis of End-of-life Options for Personal Computers: Resell, Upgrade, Recycle (WILLIAMS, 2003); Evolution of Product Lifespan and Implications for Environmental Assessment and Management: A Case Study of Personal Computers In Higher Education (WILLIAMS, 2009); Reciclagem de Cobre de Sucatas de Placas de Circuito Impresso (VEIT, 2005).

PP = Produção primária; PS = Produção secundária; EPS = Economia com a produção secundária.

Estimando a energia economizada (tendo como base os valores da Tabela 3.24), a massa e o valor monetário (valor de 2007) recuperáveis desses cinco elementos (alumínio, níquel, cobre, aço e chumbo) para mil computadores *desktops* em fim de vida (sem monitor e periféricos) teriam os seguintes resultados, conforme a Figura 3.5.

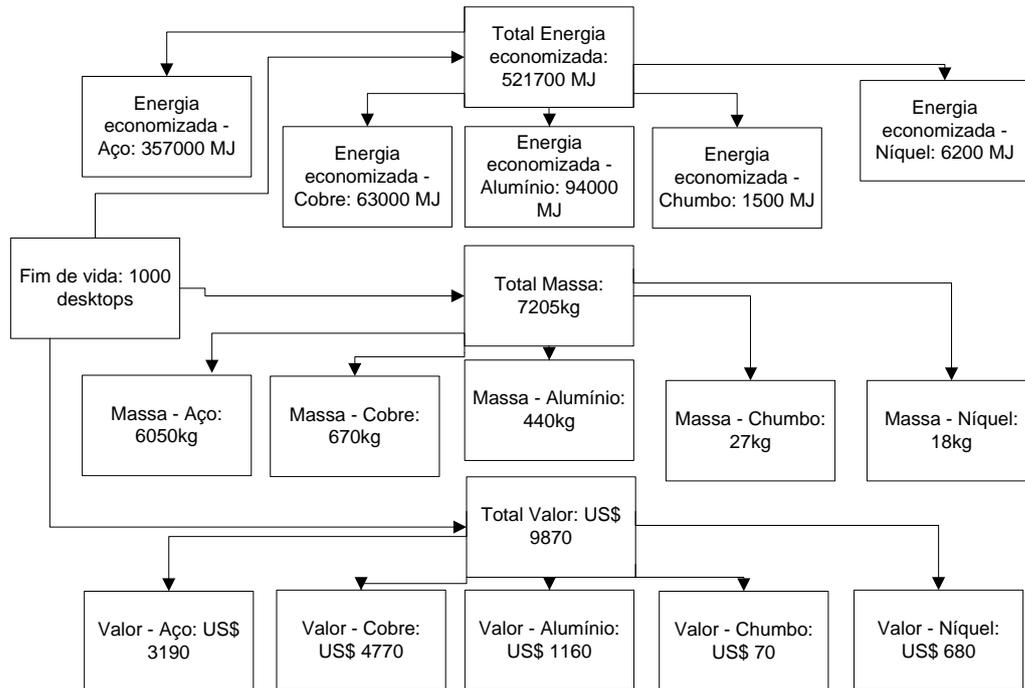


Figura 3.5: Estimativa de energia economizada, massa e valor monetário de materiais recuperáveis no alumínio, níquel, cobre, aço e chumbo de mil computadores *desktops*.

Williams (2003) mostra outros cinco elementos recuperáveis em um computador desktop que são bastante significativos no que diz respeito a valores: epóxi, estanho, ouro, plástico e prata. O epóxi representa 146 MJ de energia economizada e 1040 g em massa, o estanho 11 MJ de energia economizada e 47g em massa, o ouro teria 30 MJ de energia economizada e 0,36g em massa, o plástico teria 55 MJ de energia economizada e 650g em peso e a prata teria 2,3 MJ de energia economizada e 1,4g em peso. No total desses cinco materiais teria-se 242 MJ de energia economizada e 1737g em peso, conforme a Tabela 3.25.

Tabela 3.25: Massa x economia de energia x valor monetário em outros elementos do computador *desktop* que podem ser recuperados (modificado de ^aWILLIAMS, 2003; ^bWILLIAMS, 2009).

Elemento	^a Valor da economia energética (MJ)	^a Massa (g)	^b Valor em 2007 (US\$/unidade)
Epóxi	146	1040	-
Estanho	11	47	0,71
Ouro	30	0,36	5,64
Plástico	55	650	0,16
Prata	2,3	1,4	0,43
Total	242	1737	6,94

Fonte: Fonte: Energy Analysis of End-of-life Options for Personal Computers: Resell, Upgrade, Recycle (WILLIAMS, 2003); Evolution of Product Lifespan and Implications for Environmental Assessment and Management: A Case Study of Personal Computers In Higher Education (WILLIAMS, 2009).

A Figura 3.6 apresenta uma estimativa baseada em uma quantidade de mil computadores *desktops*, mostra à estimativa dos valores de economia energética, massa para (epóxi, estanho, ouro, plástico e prata) e valor monetário para (estanho, ouro, plástico e prata) recuperáveis de mil computadores *desktop* (sem monitor e periférico).

Somando os valores de economia energética, massa e valor monetário apenas dos seguintes elementos: o aço, cobre, alumínio, chumbo, níquel, epóxi, estanho, ouro, plástico e prata, exceto o valor monetário para epóxi, a estimativa é que para um quantitativo de mil computadores *desktops* haveria 763700 MJ de economia energética; 7.206.737 kg de massa e de valor monetário US\$ 16810,00.

Segundo Williams (2003), o valor de economia energética para o monitor CRT de 17 polegadas ainda é maior que para o computador *desktop*, enquanto em um computador *desktop* economiza cerca de 765 MJ em dez elementos selecionados, em um monitor CRT de 17 polegadas economiza cerca de 795 MJ. Portanto, fica claro que ao realizar a recuperação do material do monitor o valor da economia energética pode subir mais de 100%.

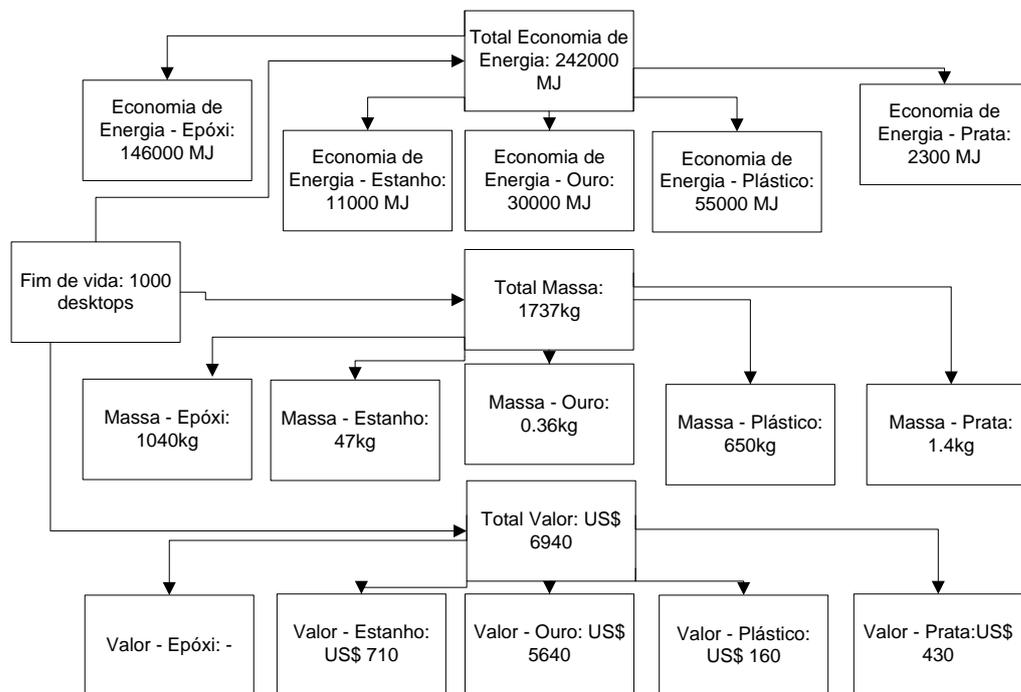


Figura 3.6: Estimativa de economia energética, massa e valor monetário de materiais recuperáveis no epóxi, estanho, ouro, plástico e prata de mil computadores desktops.

3.7.2 Placa de Circuito Impresso

Segundo Chancerel et. al (2009) as placas de circuito impresso de computador pessoal (*desktop*) contêm uma quantidade significativa de metais preciosos, conforme a Tabela 3.26.

Segundo Veit (2005), cada PCI de computador *desktop* pesa aproximadamente 0,5 kg. Estimando a quantidade de massa para se chegar ao peso de 1 tonelada seria necessário cerca de 2000 PCIs. O valor médio de preço por tonelada do ouro, prata e paládio em 2007 como é mostrado na Tabela 3.27.

Com esses dados, é possível estimar que em 2000 PCI haja 1 tonelada de PCI e que em 1 tonelada de PCI o valor da prata, ouro e paládio recuperáveis contidos valia em 2007 cerca de R\$ 15.058,64. Os valores monetários foram convertidos de DOLAR-DOS-EUA para REAL-BRASIL na data 01/06/2007 (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2012).

Tabela 3.26: Média de concentração de metais preciosos em placas de circuito impresso modificado de ^aChancerel et. al, (2009) e ^bManhart (2010).

Elemento	Prata	Ouro	Paládio
^a Concentração em grama de metal por tonelada de PCI	991	278,2	100
^b R\$ / t de metal em 2007	1.045.000	42.560.000	21.828.621,20
^b R\$ / g de metal em 2007	1,04	42,56	21,82
R\$ / t de PCI	1.035,59	11.840,19	2.182,86
Valor total ^b R\$ / t de PCI	15.058,64		

Fonte: Assessment of Precious Metal Flows During Preprocessing of Waste Electrical and Electronic Equipment, ^aChancerel et. al, (2009) e International Cooperation for Metal Recycling From Waste Electrical and Electronic Equipment, ^bManhart (2010).

Segundo Veit (2005), a concentração de metais como cobre, estanho e ouro são maiores na placa de circuito impresso que no minério, conforme mostra a Tabela 3.27. Portanto a recuperação desses materiais valiosos é interessante nas PCIs.

Tabela 3.27: Concentração de cobre, estanho e ouro em PCI e no minério (modificado de VEIT, 2005).

Elemento	% no minério	% média na PCI
Cobre	0,5 – 3,0	21,19
Estanho	0,2 – 0,85	3,17
Ouro	6 – 12 ppm	10 ppm

Fonte: Reciclagem de Cobre de Sucatas de Placas de Circuito Impresso (VEIT, 2005).

3.8 CARACTERIZAÇÃO NO BRASIL

Um dos maiores desafios que defronta a sociedade moderna é a questão do lixo urbano. Além do expressivo crescimento da geração de resíduos sólidos, sobretudo, nos países em desenvolvimento; observam-se, ainda, ao longo dos últimos anos, mudanças significativas em suas características. Essas mudanças são decorrentes, principalmente, dos modelos de desenvolvimento adotados e da mudança nos padrões de consumo (ANDRADE, 2002).

Apesar de ser um país em desenvolvimento, o Brasil teve um crescimento econômico significativo. O fator econômico é relevante para a sustentabilidade, por outro lado, há a necessidade de canalização da economia nesse âmbito. Segundo Ongondo

(2010), o aumento do consumo de EE no Brasil tem sido um motivo de preocupação no que diz respeito à sua gestão de produtos que se tornam obsoletos. No entanto, como mostra Jain (2009), a demanda por metais de economias em crescimento rápido como o Brasil vai impulsionar o mercado de recuperação do REEE. Em 2006, no Brasil, o REEE *per capita* situava-se em 2,6 kg. Em contraste, a média projetada da geração per capita dos REEE para o período 2001-2030 é de 3,4 kg com estimativa de 22,4 milhões de toneladas acumuladas (ROCHA, 2009).

A falta de uma lei federal de gestão deve ser vista como um grande obstáculo para o regulamento e desenvolvimento do tratamento de REEE (UNEP, 2009). Mas em 2010 foi assinada a POLÍTICA NACIONAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS, essa lei é um marco importante para a gestão dos resíduos sólidos como o REEE no País.

No ano 2011, segundo a FGV (2011), o Brasil tinha cerca de 85.000.000 de computadores em uso, ou seja, 44% da população com computador. Já nos EUA em torno de 330.000.000, e em todo mundo aproximadamente 2.500.000.000. Ou seja, o Brasil já tem cerca de 25% do total de computadores dos EUA e cerca de 3,4% do nível mundial.

Em 2008, o Brasil gerou cerca de 48.000 toneladas de REEE proveniente de computador, o México 28.000, Colômbia 7.000, Argentina 8.000, Peru 6.000, Venezuela 3.000, Chile 5.000, Equador 2.000, Guatemala 1.000 e outros países juntos geraram 14.000 (EMPA, 2008).

Segundo a EMPA (2008), o Brasil ocupa a primeira posição na estimativa de REEE proveniente de computador na América Latina, seguido pelo México e Argentina, conforme Figura 3.7.

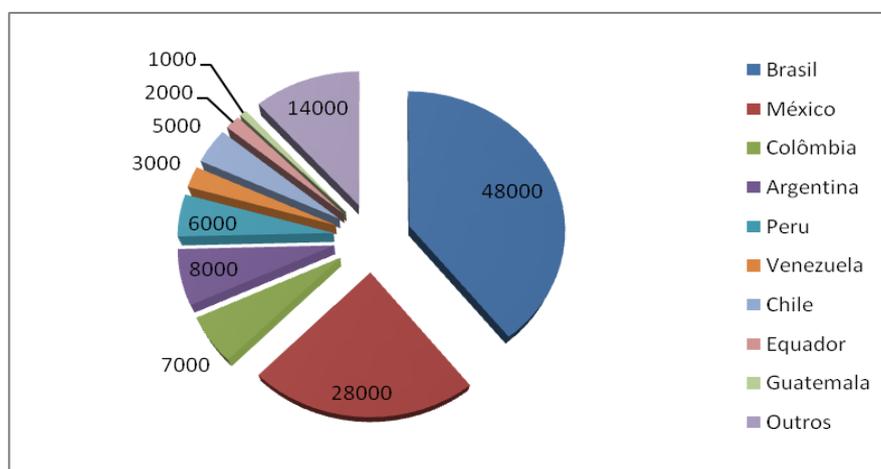


Figura 3.7: Estimativa de REEE de computador (em toneladas) na América Latina, EMPA - Gestión de Residuos Electrónicos en Colombia Diagnóstico de Computadores y Teléfonos Celulares (2008).

Segundo um estudo da IDC, o Brasil comercializou cerca de 13,7 milhões de computadores em 2010 e passou a ocupar a quarta posição no *ranking* mundial dos países que mais vendem PC's; desse número, 55% são *desktops* e 45% *notebooks*. O país ficou atrás apenas de Estados Unidos, China e Japão.

De acordo com a Abinne (2011), a venda total de computadores no Brasil em 2011 chegaria a 15.300.000, sendo que 6.275.000 vendas de *desktops* e 9.025.000 vendas de *laptops*, assim como mostra a Tabela 3.28. É possível observar que a utilização de computadores tem aumentado muito, principalmente *laptops*.

Tabela 3.28: Vendas de computadores no Brasil em mil unidades (ABINNE, 2011).

Vendas	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Mercado total de PCs	3.200.000	4.074.000	5.635.000	8.225.000	9.983.000	12.000.000	12.000.000	14.000.000	15.300.000
Desktops	n.d.	3.880.000	5.322.000	7.550.000	8.071.000	7.700.000	6.850.000	6.850.000	6.275.000
Notebooks e netbooks	n.d.	194.000	313.000	675.000	1.912.000	4.300.000	5.150.000	7.150.000	9.025.000
Mercado oficial de computador	960.000	1.100.000	2.135.000	4.380.000	6.486.000	7.920.000	8.425.000	10.585.000	n.d.
Desktops	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	5.220.000	5.000.000	4.580.000	4.725.000	n.d.
Notebooks e netbooks	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.266.000	2.920.000	3.845.000	5.860.000	n.d.
Mercado não oficial de pcs	2.240.000	2.974.000	3.500.000	3.845.000	3.497.000	4.080.000	3.575.000	3.415.000	n.d.
Desktops	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2.851.000	2.700.000	2.270.000	2.125.000	n.d.
Notebooks e netbooks	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	646.000	1.380.000	1.305.000	1.290.000	n.d.

Fonte: ABINNE – Panorama Econômico e Desempenho Setorial, 2011.

(n.d.) Não há dados.

Segundo Abinne (2010), o aumento de domicílios com computador no Brasil foi grande nos últimos anos. De 2008 a 2009 aumentou cerca de 2.373.000, conforme Tabela 3.29. Pode se observar que em todos os anos teve crescimento significativo, sendo que o maior aumento de computadores nos domicílios em relação ao ano anterior foi em 2008 e 2009.

Tabela 3.29: Dados sobre acesso a computadores nos domicílios no Brasil, modificado de Abinne (2010).

Ano	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Com computador	7.603.000	8.458.000	9.857.000	12.072.000	14.772.000	17.945.000	20.318.000
% em relação aos domicílios	15%	16%	19%	22%	27%	31%	35%

Fonte: ABINNE - Panorama Econômico e Desempenho Setorial, 2011.

Segundo a CETIC, em 2005 a média de funcionários que utilizavam computadores em empresas no Brasil, era de 17,6%; no entanto, em 2006 houve um aumento significativo, passando para 47,39%; em 2007, a média foi de 54%; em 2008, de 50%; e, em 2009, a média foi de 45%, conforme mostra a Figura 3.8.

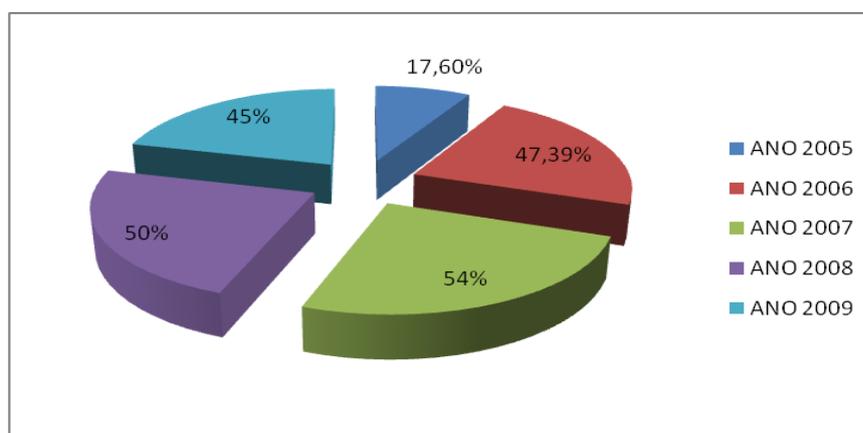


Figura 3.8: Proporção de utilização de computador por funcionários nas empresas e outras organizações no Brasil, CETIC - Uso das Tecnologias da Informação e da Comunicação (TIC), 2005-2009.

Segundo dados do IBGE (2009), a proporção de domicílios com computador no país é bastante significativa, especialmente, pelo fato de o Brasil ser um país em desenvolvimento, conforme mostra o a Figura 3.9. Em 2009, o número de domicílios com computador foi quase o dobro de 2005.

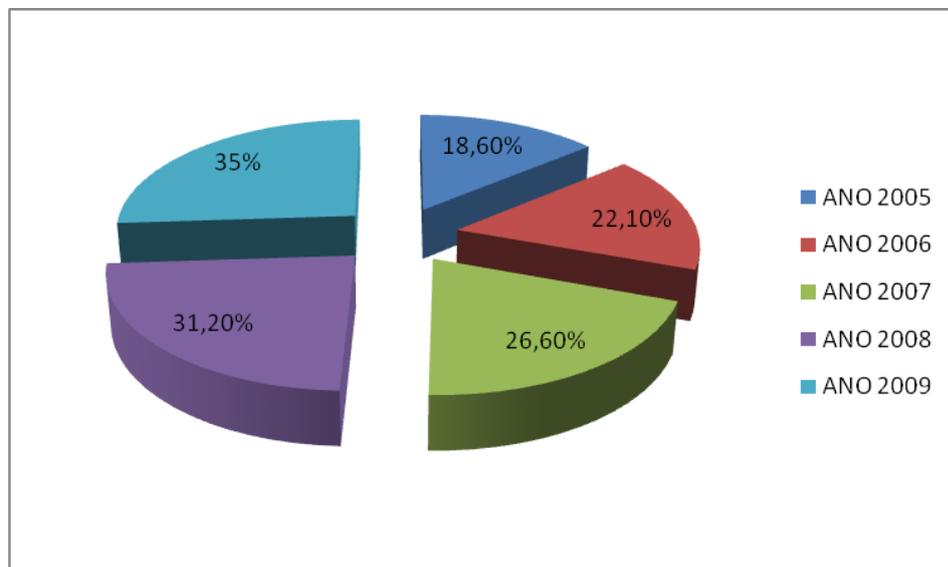


Figura 3.9: Proporção de domicílios com computador no Brasil, IBGE - Síntese de Indicadores (2005-2009).

4 - ESTUDO DE CASO: FIM DE VIDA DE COMPUTADORES NO DISTRITO FEDERAL

4.1 INTRODUÇÃO

O Distrito Federal (DF) é uma Unidade da Federação Nacional onde está situada Brasília, a capital do Brasil, que é sede do governo nacional. De acordo com o IBGE (2012), em 2000, a população residente no DF era de 2.014.132 pessoas, alcançando, em 2010, cerca de 2.486.861 pessoas, o que representa um crescimento populacional de 472.729 pessoas no decorrer de dez anos. O aumento da população foi estável, conforme a Figura 4.1. Assim, espera-se que nos próximos tenha um crescimento semelhante. Observe que o R^2 é 0,999, assim o gráfico é bastante confiável.

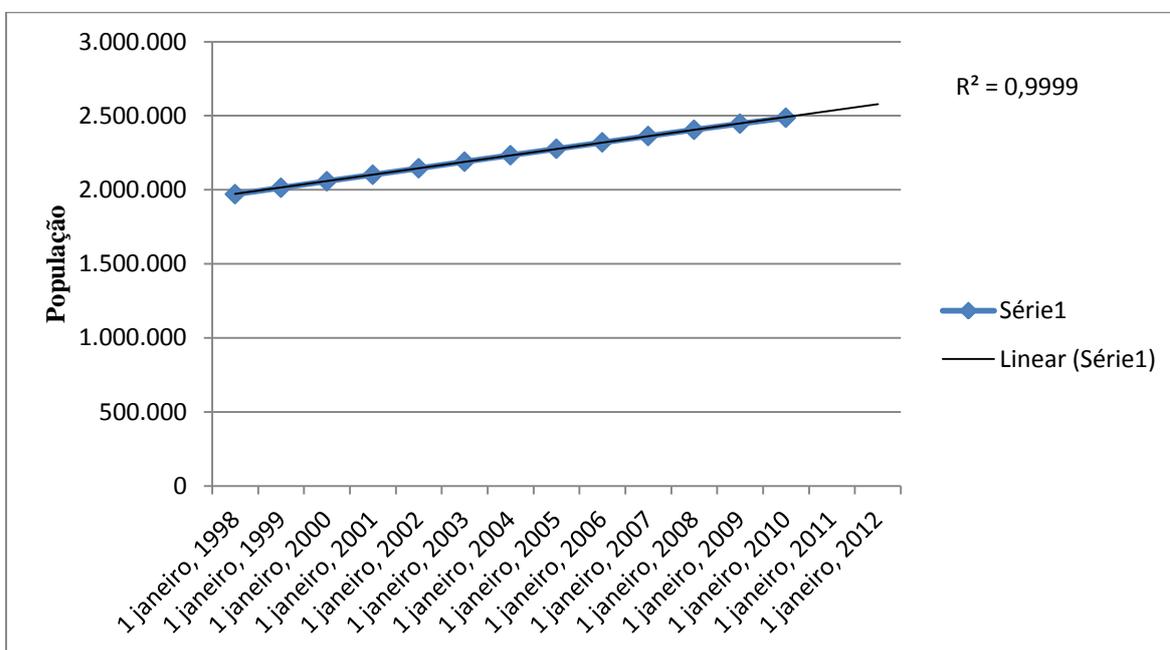


Figura 4.1: População residente no Distrito Federal, IBGE – CENSO 1998-2010.

Como detentor de uma das maiores rendas *per capita* do país, o Distrito Federal, possui um elevado padrão de consumo, o que estimula a utilização do computador. Além disso, 94% da sua economia está voltada à área de serviços (ALMEIDA e ZANETI, 2008). Segundo os dados do CETIC (2009), a média de computadores por funcionários no setor de serviços no DF é de aproximadamente 69%, enquanto o percentual geral (em todos os demais setores) seria em torno de 45,6.

Enquanto a média de domicílios com computadores em todo Brasil, no ano de 2009, foi de 34,7%, no Distrito Federal foi de 62%, quase o dobro da média nacional (IBGE, 2009). Contudo, ainda não há um gerenciamento eficiente de reciclagem de computadores na fase final de sua vida útil amplamente instalada no Distrito Federal.

Para que isso aconteça é necessário investir em tecnologias apropriadas. A coleta seletiva, etapa antecedente a esses processos, vem sendo realizada informalmente por agente ambiental, ligados ou não a cooperativas de reciclagem. Vale ressaltar que estruturar e sustentar a cadeia produtiva são possibilidades para garantir o desejado bem-estar coletivo (ALMEIDA e ZANETI, 2008).

Embora o fluxo do uso de computadores no Distrito Federal é intenso, ainda faltam políticas, gerenciamento, infra-estrutura e sistemas consolidados de tratamento de computadores na fase final de sua vida útil.

A tendência é que a região do Distrito Federal continue crescendo, tanto demograficamente como economicamente. Além de abrigar Brasília, onde está o governo Federal, possui uma grande infra-estrutura educacional e política.

A ascensão de domicílios com computador no DF é grande e em 2009 o crescimento foi maior, assim, é de se esperar que a ascensão continue nos próximos anos. A Figura 4.2 ilustra o total de domicílios com computadores e mostra que em 2009 o total de domicílios com computador é quase o dobro do total de domicílios com computador em 2005. Observe que o R^2 é 0,995 sendo a reta linear, ou seja, alto grau de confiabilidade com crescimento estável e grande em todos os anos.

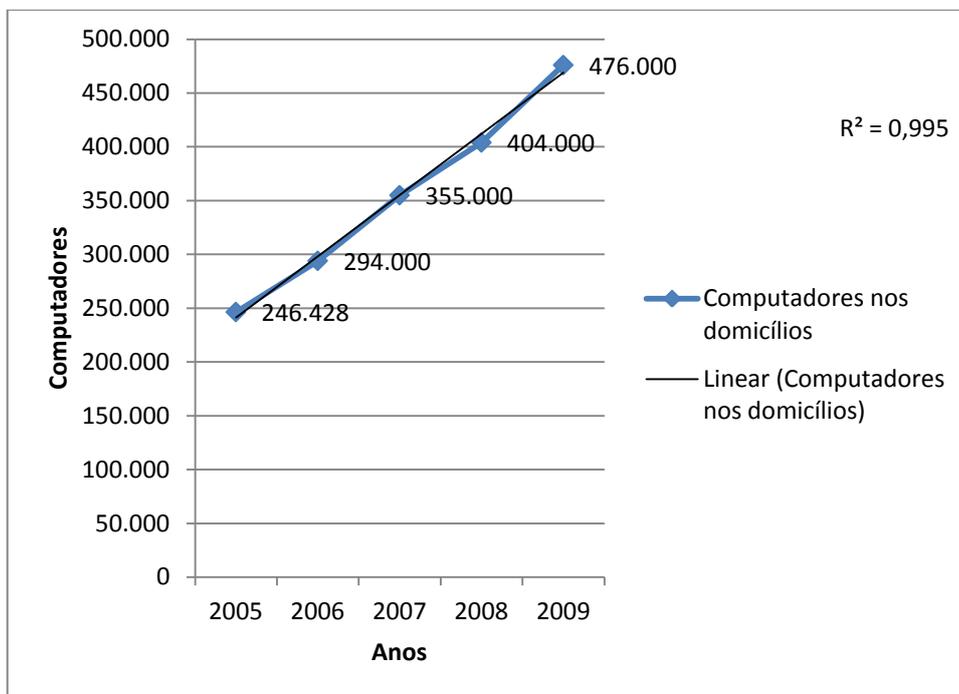


Figura 4.2: Domicílios com computador no DF, IBGE - Síntese de Indicadores (2005-2009).

Ainda segundo o IBGE (2009), o percentual de domicílios com computador no DF, de 2005 a 2009, teve ascensão significativa, ou seja, essa é uma região com grande quantidade de computadores nos domicílios, assim como mostra a Figura 4.3. Em 2005, aproximadamente 36,4% dos domicílios tinha computador; em 2006 cerca de 42,2%; em 2007 cerca de 48,4%; em 2008 cerca de 54,2%; e, em 2009, cerca de 62%.

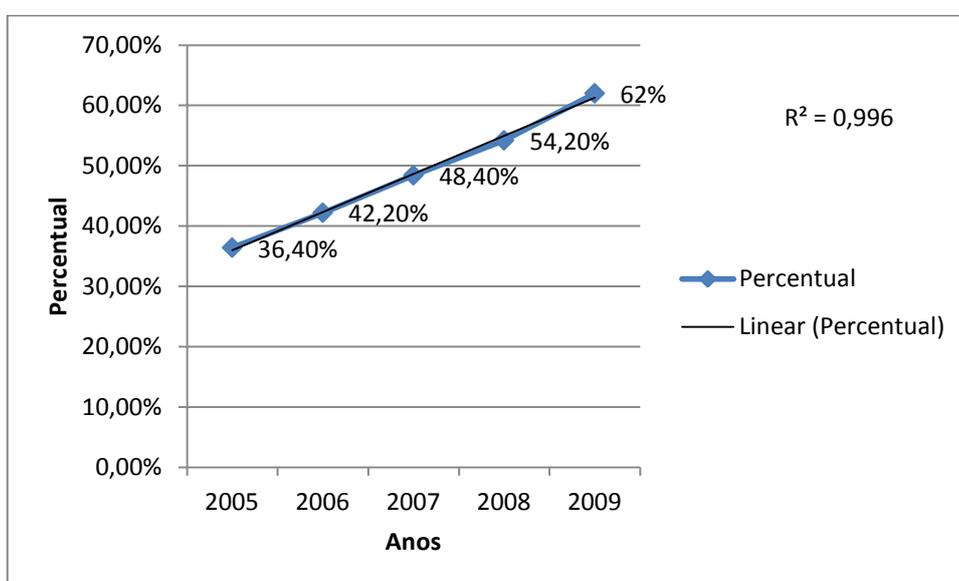


Figura 4.3: Percentual de domicílios com computador no DF, IBGE - Síntese de Indicadores (2005-2009).

Segundo o IBGE (2008), nas empresas e outras organizações do Distrito Federal, em 2005, havia 987.176 pessoas empregadas; em 2006 cerca de 1.007.828; em 2007 cerca de 1.030.757; em 2008, 1.101.500 e, em 2009 1.155.605. Pode-se observar que de 2005 a 2009 houve um aumento de aproximadamente 17%, sendo que em 2008 e 2009 houve um aumento maior em relação aos outros anos, conforme a Figura 4.4.

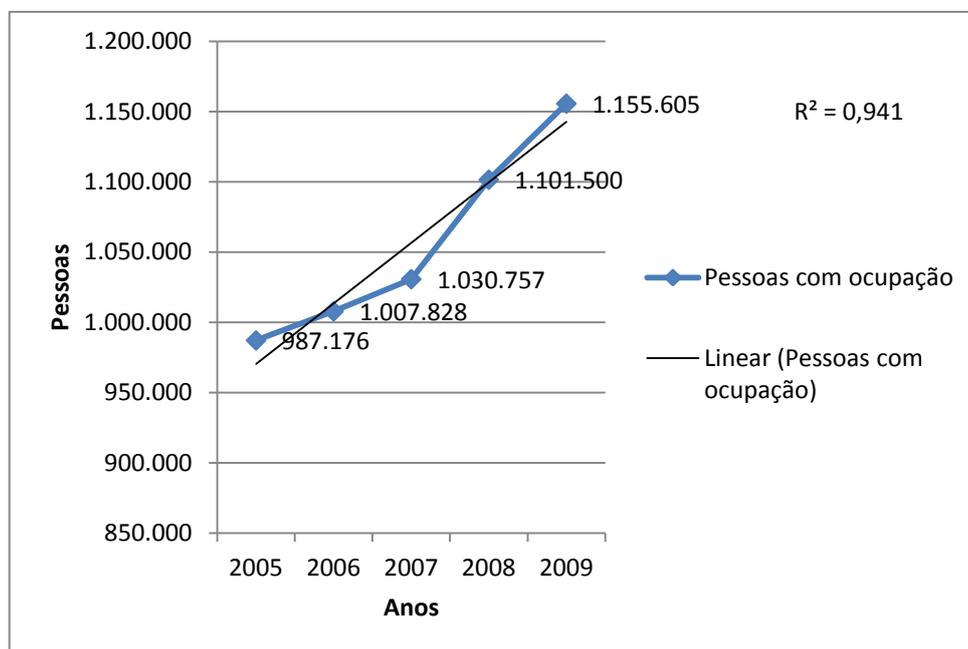


Figura 4.4: Pessoas com ocupação no DF (IBGE - Unidades locais, pessoal ocupado total e assalariado, 2005-2009).

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Na realização da pesquisa foi feito o levantamento de dados que caracteriza o computador quantitativamente em fim de vida. Assim, fez o estudo de caso, buscando caracterizar o potencial da geração de computador em fim de vida no Distrito Federal. Características como a quantidade de computador nos domicílios e quantidade de computadores nas organizações. Para mostrar esses dados e tendências foram utilizados os gráficos que apresentam um índice de confiança satisfatório, inclusive com o R^2 (grau de confiabilidade) alto.

Para se fazer a estimativa da geração de resíduo de computador no Distrito Federal, buscou-se mostrar a quantidade de computador em uso em 2008 e considerou que o tempo médio de vida desses computadores seriam de 4 anos. Assim estimou os computadores que

chegaria ao fim de vida no período de 2008 a 2012, que são os computadores em uso no ano de 2008.

Utilizou-se de variáveis que recebem valores (descritas de A até Z) dos dados coletados. Assim foi possível utilizar uma lógica matemática e fazer o cruzamento desses dados para se chegar à estimativa final.

Com a estimativa do montante de computadores em fim de vida, foram selecionados dez elementos contidos nesse REEE. Assim fez uma estimativa do quanto poderia ser economizado de energia, quanto de material reciclado e valor desse material (valor de 2007), caso essas substâncias tivessem sido recicladas.

Depois foi feita uma simulação da viabilidade de se ter uma tecnologia para reciclagem do metal, em especial do cobre de placa de circuito impresso diversas (não apenas PCI de computador). A tecnologia escolhida para análise foi a Linha Automática, descrita por Li e Xu (2010). A tecnologia utilizada tem quatro partes: trituração, triagem do material, múltiplo separador corona eletrostática (*corona electrostatic*) e precipitação de pó (*dust precipitation*). Todavia, considerou-se os valores de custo de operação para a região do Distrito Federal na simulação, exceto o valor da PCI em fim de vida que foi utilizado o valor descrito no trabalho de Li e Xu (2010) por não ter cotação desse material no DF. Utilizou-se de variáveis e expressões que recebem valores e assim foi possível computar.

A análise foi feita utilizando apenas a metade da capacidade de produção do cobre pela tecnologia. Mesmo assim constatou-se a viabilidade na simulação. A margem bruta de operação/produto alcançado foi bastante satisfatória. O processo utilizado no custo de operação não contabilizou o investimento das máquinas, imposto industrial e o aluguel do terreno para se alocar a indústria. Para verificar o grau de confiança nos cálculos calculou-se a margem de erro para o custo com os dados do trabalho de Li e Xu (2010) e o valor foi 0,02% para a Linha Automática.

4.3 RESULTADOS

Para se chegar aos resultados, são utilizadas publicações que possibilitam coletar dados do computador e das características do Distrito Federal. Por fim, é empregado um raciocínio matemático lógico para fazer a modelagem desses dados.

Com os dados já coletados, juntou-os estatisticamente. Dessa forma foi feito uma estimativa da quantidade de computador que se chegaria ao fim de vida no Distrito Federal, no período de 2008 a 2012.

Através do resultado da estimativa quantitativa de dados relacionados com a reciclagem estimou-se quanto poderia ser economizado de energia com a reciclagem do material e seu respectivo valor econômico.

Depois foi feito uma simulação da reciclagem de Placa de Circuito Impresso (PCIs em geral) com a tecnologia “Linha Automática”, descrita por Li e Xu (2010). Os valores de custo de operação foram modificados à realidade do Distrito Federal e o resultado (margem bruta de operação/produto) foi positivo.

4.3.1 Computadores no Distrito Federal em 2008

A modelagem dos dados foi ilustrada através das letras com seus respectivos resultados. Através dessas variáveis é possível se chegar a um resultado final, que é a estimativa da quantidade de computadores que se chegaria ao fim de vida no Distrito Federal, no período de 2008 a 2012, conforme a Tabela 4.1. Depois, nas espereções 4.1 a 4.12 apresentaram-se a estimativa.

Tabela 4.1: Letras para se quantificar os computadores no DF.

Variável	Descrição
(A)	Representa a estimativa (média) de computadores nos domicílios que tinha computador no Brasil em 2008 (modificado de FGV, 2008 e IBGE, 2008).
(B)	Representa o percentual das organizações do setor de serviços no Distrito Federal em 2008, é igual a 94% (ALMEIDA e ZANETI, 2008).
(C)	Representa o percentual das empresas de outros setores no Distrito Federal, exceto o setor de serviços (modificado de ALMEIDA e ZANETI, 2008).
(D)	Representa o percentual de funcionários do setor de serviços que utilizava computador no Distrito Federal em 2008, é igual a 69% (CETIC, 2009).
(E)	Representa o percentual de funcionários que utilizavam computadores no Distrito Federal (exceto do setor de serviços) em 2008, é igual a 45,6% (CETIC, 2009).
(F)	Representa a quantidade de pessoas empregadas no Distrito Federal em 2008, é igual a 1.101.500 (IBGE, 2008).
(G)	Representa a média de funcionários por computador, dos que utilizam

Variável	Descrição
	computador no Brasil, é igual a 1,1 (CETIC, 2009).
(H)	Representa a quantidade de domicílios com computador no Distrito Federal em 2008, é igual a 404.000 (IBGE, 2008).
(I)	Representa a quantidade de pessoas com ocupação na área de serviços no Distrito Federal em 2008 (modificado de IBGE, 2009; ALMEIDA e ZANETI, 2008 e CETIC, 2008).
(J)	Representa a quantidade de pessoas com ocupação em outros setores (exceto serviços) no Distrito Federal em 2008 (modificado de IBGE, 2009; ALMEIDA e ZANETI, 2008 e CETIC, 2008).
(L)	Representa a quantidade de domicílios com computador no Brasil em 2008, é igual a 17.945.000 (IBGE, 2008).
(M)	Representa a quantidade de computadores em uso no Brasil em 2008, é igual a 50.000.000 (FGV, 2008).
(N)	Representa a quantidade de computadores nos domicílios do Brasil em 2008 (modificado de IBGE, 2008 e FGV, 2008).
(O)	Representa a quantidade de computadores nas empresas e outras organizações do Brasil em 2008 (modificado de IBGE, 2008 e CETIC, 2008).
(P)	Representa a quantidade de pessoal com ocupação (empregados) no Brasil em 2008, é igual a 44.574.884 (IBGE, 2008).
(Q)	Representa a quantidade de computadores nos domicílios do Distrito Federal em 2008 (modificado de IBGE, 2009; FGV, 2009 e CETIC, 2009).
(R)	Representa a quantidade de computadores nas empresas e outras organizações do Distrito Federal em 2008 (modificado de IBGE, 2009; FGV, 2009 e CETIC, 2009).
(S)	Representa o tempo de vida dos computadores no período de 2008 a 2012 no Distrito Federal, é igual a 4 aos (autor do trabalho baseado em várias publicações).
(T)	Representa o percentual de <i>desktop</i> vendido no Brasil no período de 2004 a 2008, é igual a 81,47% (ABINNE, 2009).
(U)	Representa a quantidade de computadores em uso no Distrito Federal em 2008 (modificado de IBGE, 2009; FGV, 2009 e CETIC, 2009).
(V)	Representa a quantidade de computadores que chegariam ao fim de vida no Distrito Federal de 2008 a 2012 (modificado de IBGE, 2009; FGV, 2009 e CETIC, 2009).
(X)	Representa a quantidade de computador <i>desktop</i> que chegaria ao fim de vida no Distrito Federal de 2008 a 2012 (modificado de ABINNE, 2009; IBGE, 2009; FGV, 2009 e CETIC, 2009).
(Z)	Representa a quantidade de computador <i>laptop</i> que chegaria ao fim de vida no Distrito Federal no período de 2008 a 2012 (modificado de ABINNE, 2009; IBGE, 2009; FGV, 2009 e CETIC, 2009).

Fonte: FGV - 23ª Pesquisa Anual do Uso de TI, 2012; CETIC - A3 - proporção de funcionários que usam computadores, 2008-2009; IBGE - Síntese de Indicadores (2008-2009); ABINNE – Panorama Econômico e Desempenho Setorial, 2011.

$$A = \frac{N}{L} = 1,75 \quad (4.1)$$

$$C = 100\% - B = 6\% \quad (4.2)$$

$$I = F \frac{B}{100} = 1.035.410 \quad (4.3)$$

$$J = F \frac{C}{100} = 66.090 \quad (4.4)$$

$$N = M - O = 31.521.685 \quad (4.5)$$

$$O = E \frac{P}{\frac{100}{G}} = 18.478.315 \quad (4.6)$$

$$Q = A \times H = 707.000 \quad (4.7)$$

$$R = I \frac{D}{\frac{100}{G}} + J \frac{E}{\frac{100}{G}} = 676.881 \quad (4.8)$$

$$U = Q + R = 1.383.881 \quad (4.9)$$

$$V = U = 1.383.881 \quad (4.10)$$

$$X = V \frac{T}{100} = 1.127.447 \quad (4.11)$$

$$Z = V - X = 256.434 \quad (4.12)$$

A estimativa de computadores nos domicílios que tem computador no Brasil é de 1,75 (A), foi utilizado esse dado, em virtude de não ter um específico do Distrito Federal. Como o poder aquisitivo do Distrito Federal é grande em relação a todo Brasil, assim esse número pode ser maior e dessa forma o quantitativo de computador pode ser um pouco maior.

De acordo com os dados de Almeida e Zaneti (2008), 94% (B) das empresas e outras organizações do DF são da área de serviços e 69% (D) dos funcionários desse setor utilizam computador (CETIC, 2009). Segundo o IBGE (2008), em 2008 havia cerca de 1.101.500 (F) pessoas empregadas, ou seja, cerca de 1.035.410 (I) pessoas tinham ocupação na área de serviços no DF e apenas 66.090 (J) pessoas tinham ocupação em outros setores e desses, segundo o CETIC (2008), 45,6% utilizavam computador (E). Para se chegar a esse número somou os valores de todos os setores, exceto o setor de serviços, e calculou a média aritmética. Ainda segundo o CETIC (2008), cada computador nas empresas e outras organizações eram utilizados por uma média de 1,1 (G) funcionários que utilizava computador.

Segundo o IBGE (2008), no Distrito Federal, em 2008, havia cerca de 404.000 (H) domicílios com computador e 1.101.500 (F) pessoas ocupadas nas empresas e em outras organizações, sendo 1.035.410 (I) na área de serviços e 66.090 (J) em outros setores.

Com esses dados estima-se que nos domicílios do Distrito Federal, em 2008, havia aproximadamente 707.000 (Q) computadores em uso nos domicílios. Já o número de computadores nas empresas e em outras organizações era 676.881 (R). Somando os computadores nos domicílios e os computadores nas empresas e em outras organizações estima-se que havia aproximadamente **1.383.881** (U) computadores em uso no Distrito Federal em 2008.

4.3.2 Computador na fase final de vida útil no DF

Ao levar em conta que havia 1.383.881 (U) computadores em uso no ano de 2008 e considerando que esses computadores teriam um tempo médio de vida de 4 anos, isso significa que até 2012 esses computadores chegariam ao final de sua vida útil. Assim, de 2008 a 2012, cerca de **1.383.881** (V) computadores chegariam ao final de sua funcionalidade no Distrito Federal.

4.3.3 Desktops no final da vida útil no DF

Para estimar o total de computadores *desktop*, consideramos o percentual de vendas no período de 2004 a 2008 no Brasil (computadores em uso em 2008), que segundo a Abinne (2010) foi de aproximadamente 81,47%, pois o tempo de uso é estimado em 4

anos. Assim, a estimativa é 1.127.447 (X). Para calcular o total de *laptops* é preciso subtrair os *desktops* do total de computadores. A estimativa é que de 2008 a 2012 cerca de 256.434 (Z) *laptops* chegaria ao final da sua vida útil no Distrito Federal.

Já o número de computador em uso no Distrito Federal em 2012 é outro, pois em 2008, em todo Brasil havia cerca de 50.000.000 em uso e para 2012 seria 100.000.000 (FGV, 2012). Então se no DF tiver aumentado na mesma proporção que em todo Brasil, esse número pode ser o dobro, ou seja, cerca de 2.767.762, conforme a Figura 4.5.

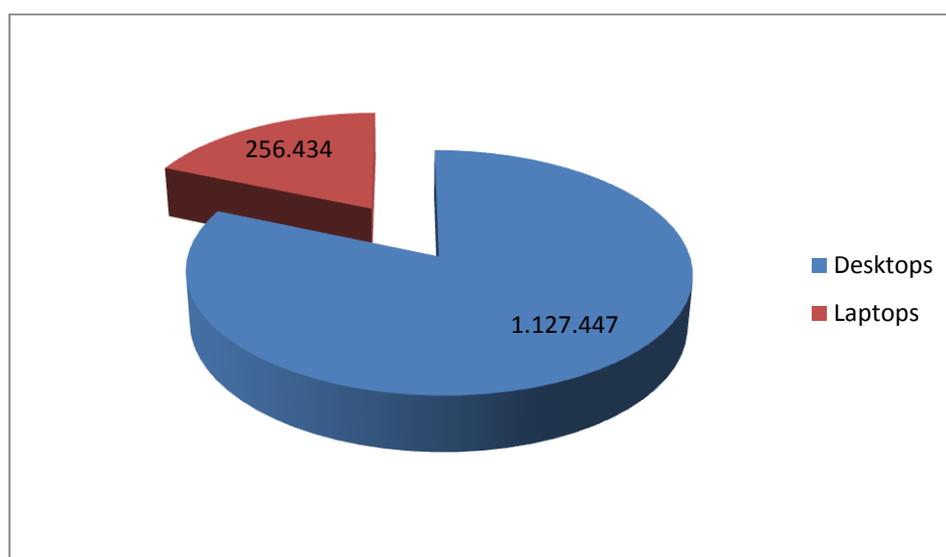


Figura 4.5: Estimativa de *desktops* e *laptops* no final de sua vida – de 2008 a 2012 no DF.

4.3.4 ESTIMATIVA COM A RECUPERAÇÃO

Estimou-se a economia de energia, recuperação de massa e valor monetário, valor monetário com base nos valores de 2007, de alguns elementos (alumínio, níquel, cobre, aço, chumbo, epóxi, estanho, ouro, plástico e prata), exceto valor monetário para epóxi. Esses materiais poderiam ser recuperados do computador *desktop* que chegaria ao fim de sua vida útil no DF entre 2008 e 2012 (1.127.447), conforme mostra a Tabela 4.2. A estimativa teve como base a caracterização dos materiais contido no computador *desktop*, de acordo com Veit, 2003 e Veit, 2009 e o quantitativo estimado nesse estudo de caso. Os valores monetários foram convertidos de DOLAR-DOS-EUA para REAL-BRASIL, considerou-se a conversão na data 01/06/2007 quando 1 US\$ valia R\$1,90.

Tabela 4.2: Alguns materiais que poderiam ser recuperados dos desktops que chegariam ao fim de vida de 2008 a 2012 no DF (modificado de ^aWILLIAMS, 2003; ^bWILLIAMS, 2009).

Elemento	^a Economia de Energia (MJ)	^a Massa (kg)	^b Valor em 2007 (R\$)
Total	863.624.402	10.083.615,38	36.100.501,23
Aço	402.498.579	6.821.054,4	6.850.719,87
Epóxi	164.607.262	1.172.544,88	-
Alumínio	105.980.018	496.076,68	2.491.171,73
Cobre	71.029.161	755.389,49	10.243.865,83
Plástico	62.009.585	732.840,55	343.609,73
Ouro	33.823.410	405,88092	12.112.244,14
Estanho	12.401.917	52.990,009	1.524.768,40
Níquel	6.990.171,4	20.294,046	1.460.341,59
Prata	2.593.128,1	1.578,4258	923.451,23
Chumbo	1.691.170,5	30.441,069	138.900,47

Fonte: Energy Analysis of End-of-life Options for Personal Computers: Resell, Upgrade, Recycle (^aWILLIAMS, 2003); Evolution of Product Lifespan and Implications for Environmental Assessment and Management: A Case Study of Personal Computers In Higher Education (^bWILLIAMS, 2009).

4.3.5 COMPUTADOR *DESKTOP* VERSUS *LAPTOP*

No ano de 2008, a estimativa é que havia uma quantidade muito maior de computador *desktop* (1.127.447) no DF em relação ao *laptop* (256.434). Mas as vendas do computador *laptop* em todo Brasil vem aumentando muito. Assim, a tendência é que as vendas de computadores portáteis continue crescendo e a venda dos computadores de mesa diminua. No ano 2010 já houve uma maior venda do *laptop* - assim como em 2011, conforme a Figura 4.6.

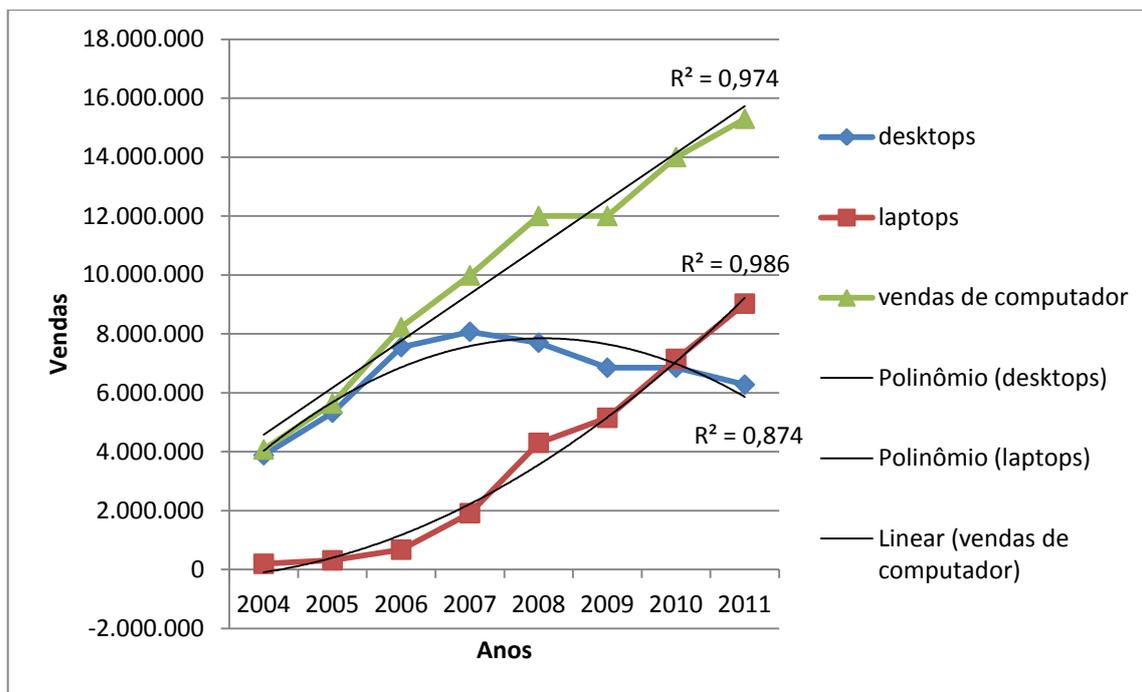


Figura 4.6: Vendas do computador *desktop versus laptop* no Brasil (modificado de ABINNE – Panorama Econômico e Desempenho Setorial, 2011).

Considera-se nesse trabalho que o aumento da venda do *laptop* em detrimento da queda da venda do *desktop* no Distrito Federal é proporcional ao respectivo percentual da venda no Brasil. Assim, observa-se que em 2004 o percentual de vendas de *laptop* era pequeno, 4,76%, mas a cada ano foi aumentando e em 2011 já era 58,98%, conforme a Figura 4.7 (modificado de ABINNE, 2012).

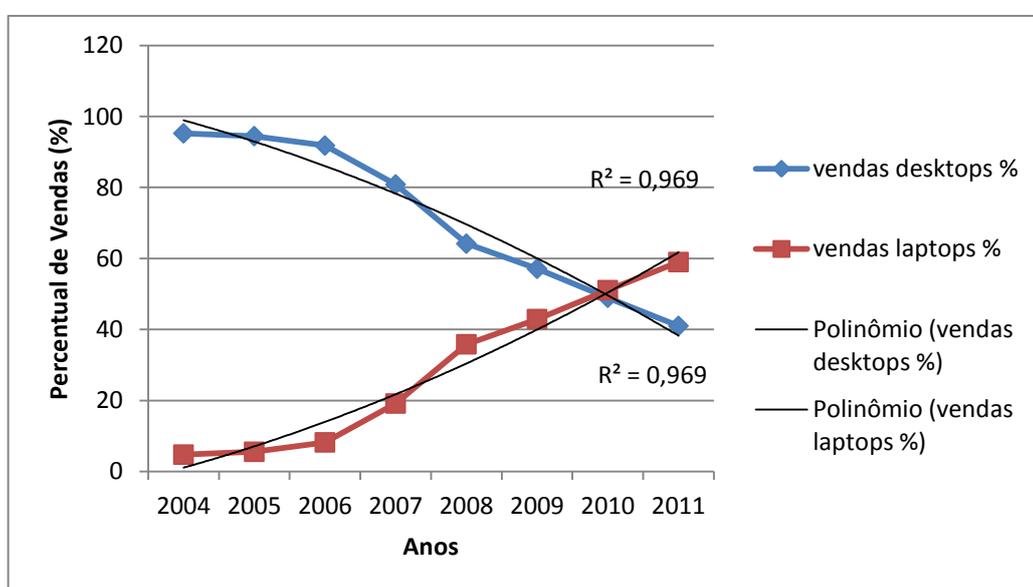


Figura 4.7: Percentual de venda do *desktop versus laptop* no Brasil (modificado de ABINNE – Panorama Econômico e Desempenho Setorial, 2011).

Considerando-se que o computador *desktop* e *laptop* tem um tempo de vida médio de 4 anos, pode se dizer que os computadores em uso no Distrito Federal em janeiro de 2012 são os que foram vendidos em 2008, 2009, 2010 e 2011. Assim, a quantidade de computador *desktop* vendido no período de 2008 a 2012 no Brasil foi 27.675.000 e laptops 25.625.000, ou seja, 52% *desktops* e 48% laptops (ABINNE, 2012). Assim, é razoável dizer que cerca de 52% dos computadores do DF em uso na data 01/2012 são *desktops* e 48% são laptops. Assim, pode se dizer também que, de 2012 até 2016, cerca de 52% dos computadores que chegaria ao fim de vida seria *desktop* e 48% *laptop*, conforme a Figura 4.8.

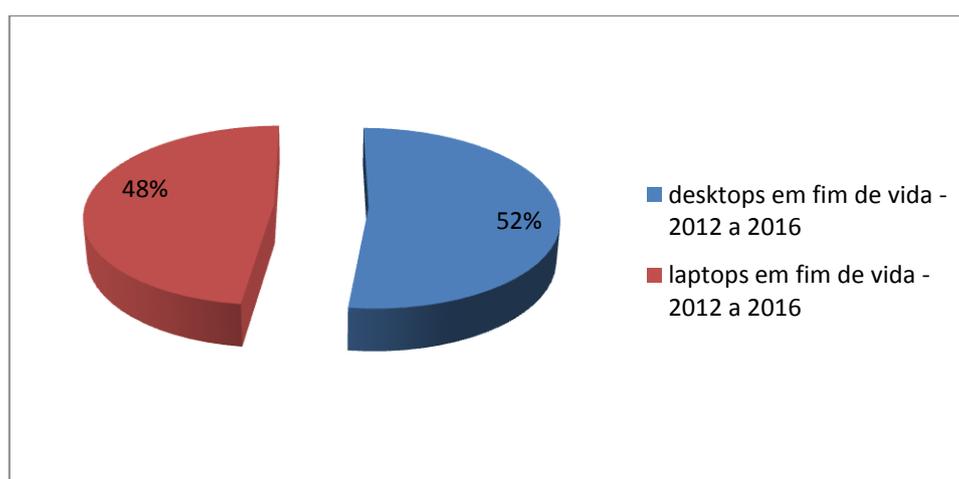


Figura 4.8: Estimativa do percentual de *desktop* versus *laptop* em fim de vida – 2012 a 2016.

4.3.6 SIMULAÇÃO DA VIABILIDADE

Para que se possa verificar a viabilidade de se ter uma tecnologia para reciclagem de placa circuito impresso no Distrito Federal em grande escala, fez se uma simulação baseada na linha automática, apresentada em Li e Xu (2010).

Os valores foram adequados à realidade do Distrito Federal/Brasil, uma vez que o custo de operação da Linha Automática no artigo tratava de uma linha em funcionamento na China. Entre estes se destaca o custo da mão de obra. Não foi contabilizado o investimento nas máquinas, imposto industrial e o aluguel do terreno para se alocar a indústria.

A adequação das variáveis utilizadas na Expressão 3.1 e Expressão 3.2, propostas por Li e Xu (2010), são apresentadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Valores utilizados na estimativa.

Variável	Valor	Descrição
R	30%	Percentual de metal recuperado em relação ao resíduo de PCI, nesse caso é o cobre (LI e XU, 2010).
A	R\$2.282,29	Custo do material da PCI (REEE) apresentado em (LI e XU, 2010) transformado em real. Valor do dólar: R\$ 1,7761 em 09/03/2012 (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2012).
Mc	1 tonelada	Massa de PCI, resíduo para reciclagem que é igual a 1 tonelada (LI e XU, 2010).
Mr	0,3 tonelada	Representa a massa de cobre recuperado (LI e XU, 2010).
B	32,36	Custo de 2 operadores/hora, pois o custo de um operador é R\$ 16,18/hora.
C	52.800 h	Representa o tempo que há produção em toda vida útil que é 10 anos (LI e XU, 2010).
D	R\$ 0,2141 quilowatt- hora	Representa o custo da energia elétrica para a indústria (ANEEL - Tarifa Regional, 2012 e CEB - Tarifas do Grupo A - Convencional, 2012).
E	R\$ 14.809,93	Representa o preço do cobre (recuperado) por tonelada (LONDON METAL EXCHANGE – LME Copper, 2012).
F	5,24	Representa o custo de manutenção/hora (LI e XU, 2010).
Taxa de metal recuperado	0,90	Representa a taxa de cobre que é recuperado (LI e XU, 2010).
<i>EnergiaElétrica</i>	130	Representa a quantidade de quilowatt gasto em cada hora (LI e XU, 2010).

A aplicação dos valores modificados à realidade do Distrito Federal e simulada aqui neste trabalho para a recuperação do cobre, outros materiais contido na PCI não foram

avaliados, estão demonstrada na Expressão 4.13, Expressão 4.14, Expressão 4.15, Expressão 4.16, Expressão 4.17 e Expressão 4.18.

Então pode ser computado o percentual de metal recuperado (R), nesse caso é o cobre recuperado, o custo de operação, margem bruta de operação/produto, a tonelada produzida em um ano e a tonelada de PCI para reciclagem em um ano e margem bruta de operação/produto em um ano, conforme a Expressão 4.13, Expressão 4.14, Expressão 4.15, Expressão 4.16, Expressão 4.17 e Expressão 4.18, respectivamente. Os valores do processo simulado podem ser visualizados na Tabela 4.4.

$$R = \frac{Mr}{Mc} 100 \% \quad (4.13).$$

$$\text{custo de operação} = A + B + D \times \text{energiaEletrica} + F \quad (4.14).$$

$$\begin{aligned} \text{margem bruta de operacao/produto} \\ = E \times \text{taxa de metal recuperado} \times 0,3 - \text{custo de operação} \end{aligned} \quad (4.15).$$

$$\text{tonelada produzida em um ano} = \text{ProHora} \times \text{HorasProAno} \quad (4.16).$$

$$\text{tonelada de PCI para reciclagem em um ano} = \text{HorasAno} \times \text{ToneladaHora} \quad (4.17).$$

$$\begin{aligned} \text{margem bruta de operação/produto em um ano} \\ = \text{lucroHora} \times \text{HorasAnoPro} \end{aligned} \quad (4.18).$$

$$R = 30\% \quad (4.13).$$

$$\text{custo de operação} = \text{R\$}2.347,19 \quad (4.14).$$

$$\text{margem bruta de operação/produto} = \text{R\$}1.675,25 \quad (4.15).$$

Considerando-se que uma Linha Automática é capaz de produzir a reciclagem de 0,3 toneladas de cobre por hora. Em um ano, como um ano tem 12 meses e a tecnologia produz como saída 440 horas por mês. Em um ano essa tecnologia seria capaz de produzir 1.584 toneladas de cobre de um total de 5.280 toneladas de PCI, conforme a Expressão 4.16 e a Expressão 4.17, respectivamente.

$$\text{tonelada produzida em um ano} = 1584 \quad (4.16).$$

$$\text{tonelada de PCI para reciclagem em um ano} = 5280 \quad (4.17).$$

De acordo com a simulação, quando se recicla uma tonelada de PCI obtém-se uma margem bruta de operação/produto de R\$1.675,25 com a linha automática. Assim, com a reciclagem de 5280 toneladas de PCI, em um ano, obtém-se uma margem bruta de operação/produto de R\$ 8.845.320,00 apenas da reciclagem do cobre. Na Tabela 4.4 estão apresentados os valores da simulação.

$$\text{margem bruta de operação/produto em um ano} = \text{R\$ } 8.845.320,00 \quad (4.18).$$

Tabela 4.4: Valores da simulação de viabilidade.

Em uma hora de produção					Em um ano de produção		
Tempo de processamento (h)	PCI para reciclagem (t)	Custo de operação (R\$)	Cobre reciclado (t)	Margem bruta de operação/produto (R\$)	Cobre produzido em um ano (t)	PCI para reciclagem em um ano (t)	Margem bruta de operação/produto em um ano (R\$)
1	1	2.379,55	0,3	1.642,89	1584	5280	8.845.320,00

Como no Distrito Federal/Brasil não tem um valor estabelecido para a tonelada de placa de circuito impresso em fim de vida. Utilizou-se o valor utilizado no trabalho de (LI e XU, 2010) convertido em REAL e atualizado para 09/03/2012.

Segundo (LI e XU, 2009), a linha automática é capaz de produzir até 600 Kg/h de cobre, assim pode se deduzir que pode reciclar cerca de 2 t/h de PCI, pois produzindo 300 Kg/h recicla 1 t/h. No entanto, a simulação foi feita para a produção de 300 Kg/h (1 t/h de PCI processada) e o montante de PCI para a reciclagem, portanto, é cerca de 5.280 t por ano.

Considerando que a tecnologia é capaz de processar até 10.560 t de PCI em apenas 1 ano. Mas processando a metade (5.280 t) a margem bruta de operação/produto é cerca de R\$ 8.845.320,00. Assim, a menor quantidade de PCI para que essa tecnologia seja viável em um ano no Distrito Federal são 5.280 t, pois, ainda que tenha um gargalo de processamento a margem bruta de operação/produto é satisfatória.

Observe que a simulação foi descrita para placas de circuito impresso diversas, ou seja, qualquer tipo de PCI. Por outro lado, no DF/Brasil não tem sistemas para recuperação de placa de circuito impresso funcionando amplamente. Além disso, ainda falta uma logística para reciclagem do REEE.

Na placa de circuito impresso tem muitos materiais além do cobre. Assim, a margem bruta de operação/produto total na reciclagem dos metais contido em uma

tonelada de PCI é outro. Por exemplo, segundo (VEIT, 2005) o valor do cobre contido em uma PCI rica (bastante material precioso) de computador pessoal é cerca de 12%. Já na PCI pobre (pouco material precioso) o valor do cobre é cerca de 50%. Assim pode se deduzir que a margem bruta de operação/produto aqui simulada representa uma parte do valor material da placa de circuito impresso em fim de vida.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Muito computador chega ao fim de vida no DF e, como ainda não há um gerenciamento adequado e abrangente na região. Assim, é interessante que venha ter uma tecnologia para reciclagem de REEE, especialmente da placa de circuito impresso.

Como a simulação nesse trabalho é positiva no que se diz respeito à margem bruta de operação/produto e não é agressiva ao ambiente, com baixo custo energético. Assim, a reciclagem se mostra interessante.

A tecnologia simulada recicla placa de circuito impresso em geral e não apenas de computador. Portanto, isso é interessante, pois se torna mais fácil conseguir o resíduo para que seja reciclado.

Como o cobre representa uma parcela do material que se pode reciclar da placa de circuito impresso. Mesmo assim, a margem bruta de operação/produto da reciclagem do cobre é interessante, cerca de R\$ R\$ 8.845.320,00 por ano. Todavia, outros metais também podem ser recuperados, embora nesse trabalho tenha simulado apenas a reciclagem do cobre.

A reciclagem aqui simulada é viável e para que tenha sucesso em sua aplicação é necessário que tenha uma estratégia para coletar as placas de circuito impresso, pois a tecnologia precisa de no mínimo 5.280 t/a. Esse colecionamento de PCI se faz interessante não apenas no DF, mas sim em outras regiões do Brasil. Assim se faz necessário uma logística na qual não foi investigada nesse trabalho.

5 - CONCLUSÃO

Enquanto a utilização de eletroeletrônicos como o computador aumenta, seu tempo de vida útil diminui e assim, a disposição do REEE aumenta. Por outro lado, a produção desses equipamentos utilizando-se apenas da extração de matéria primária se gasta muita energia e polui o ambiente. Já a reciclagem mássica do computador em fim de vida para se produzir material economizou energia.

A estimativa dos computadores em fim de vida no Distrito Federal mostra que de 2008 a 2012 cerca de 1.383.881 computadores chegariam ao fim de vida, sendo 1.127.447 *desktops* e 256.434 *laptops*. Já de 2012 a 2016 considerando que tenha o mesmo percentual de ascensão de todo Brasil, cerca de 2.767.762 computadores podem chegar ao fim de vida, sendo cerca de 52% *desktops* e 48% *laptops*.

Se os computadores *desktops* que chegaram ao fim de vida de 2008 a 2012 tivesse sido reciclados teria economizado cerca de 863.624.402 MJ de energia.

A Linha Automática foi escolhida para simulação da viabilidade de se ter uma tecnologia para reciclagem de cobre da placa de circuito impresso no Distrito Federal. O resultado da simulação mostra que é possível produzir 1.584 toneladas de cobre a partir de um total de 5.280 toneladas de placa de circuito impresso, utilizando se apenas a metade da capacidade de produção da tecnologia.

Com esse montante, pode-se ter uma margem bruta de operação/produto anual de R\$ 8.845.320,00. Dessa forma o mínimo de placa de circuito impresso para que seja viável é cerca de 5.280 toneladas/ano, pois mesmo com uma margem bruta de operação/produto alta a tecnologia utiliza apenas a metade da capacidade de produção.

Nas regiões em desenvolvimento como no DF/Brasil o gerenciamento do REEE não é amplamente empregado, muitas vezes é tratado como lixo comum. A Política Nacional dos Resíduos Sólidos, aprovada em 2010, trouxe expectativa de um melhor gerenciamento. Mas ainda necessita de métodos de controle por parte do governo.

Como proposta para trabalhos futuros pode-se citar: O potencial da economia energética com a reciclagem mássica de *laptops*, pois a utilização desses equipamentos tem aumentado consideravelmente e ainda é escasso trabalhos nessa linha de pesquisa, como também o estudo sobre a logística para se agrupar placa de circuito impresso, principalmente para regiões em desenvolvimento como o Distrito Federal/Brasil.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABINNE – **Panorama Econômico e Desempenho Setorial**, 2011. Disponível em < <http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/pan2011.pdf> >. Acesso em: 10/03/2012.

ABINNE **Associação Brasileira da Indústria de Eletro e Eletrônica**, acesso em: < <http://www.abinee.org.br/> >. Acessado em: 25/02/2012.

ABRANTES A. D. J. R. **Reciclagem de Placas de Circuito Impresso: Otimização da Operação de Processamento Físico**, 2009. Disponível em: < <https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/323616/1/dissertacao.pdf> >. Acesso em: 19/08/2011. Acesso em: 27/02/2011.

ALMEIDA G. V., ZANETI B. B. C. I. **Resíduos Sólidos Urbanos: Uma Análise do Mercado de Recicláveis do Distrito Federal, DF**, 2008. Disponível em: < <http://www.anppas.org.br/encontro4/cd/ARQUIVOS/GT11-400-652-20080508170910.pdf> >. Acesso em: 08/07/2011.

ANDRADE R. **Caracterização e Classificação de Placas de Circuito Impresso de Computadores como Resíduos Sólidos, 2002**. Disponível em: < <http://cutter.unicamp.br/document/?code=vtls000283929> >. Acesso em: 26/02/2011.

ANDRADE T. G. R.; FONSECA S. M. C. MATTOS K. M. C. **GERAÇÃO E DESTINO DOS RESÍDUOS ELETRÔNICOS DE INFORMÁTICA NAS INSTITUIÇÕES DE ENSINO SUPERIOR DE NATAL-RN**, 2010. Disponível em: < <http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/viewFile/395/328> >. Acesso em: 26/02/2011.

ANDRAE A. S. G., ANDERSEN O. **Life cycle assessments of consumer electronics — are they consistent?**, 2010. The International Journal of Life Cycle Assessment Volume 15, Number 8, 827-836, DOI: 10.1007/s11367-010-0206-1. Disponível em: < <http://www.springerlink.com/content/9lpw6h737487x855/> >. Acesso em: 26/02/2011.

ANEEL – **Tarifa Regional**, 2012. Disponível em: < http://rad.aneel.gov.br/reportserverSAD?fSAD_REPORTS%2fSAMP_TarifaMedCConsumoRegiao&rs:Command=Render >. Acesso em: 08/03/2012.

BABBITT W. C., KAHHAT R., WILLIAMS E., GREGORY A. B., **Evolution of Product Lifespan and Implications for Environmental Assessment and Management:**

A Case Study of Personal Computers In Higher Education, 2009. Disponível em: < <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es803568p> >. Acesso em: 26/02/2011.

BARBA-GUTIÉRREZ Y., ADENSO-DÍAZ B., LOZANO S. **Eco-Efficiency of Electric and Electronic Appliances: A Data Envelopment Analysis (DEA)**, 2008. Environmental Modeling and Assessment Volume 14, Number 4, 439-447, DOI: 10.1007/s10666-007-9134-2. Disponível em: < <http://repositorio.bce.unb.br/handle/10482/5005?mode=full> >. Acesso em: 10/05/2012.

BEREKETLI I., EROL – GENEVOIS M., ESRA – ALBAYRAK Y., OZYOL M. **WEEE TREATMENT STRATEGIES' EVALUATION USING FUZZY LINMAP METHOD**, 2011. Disponível em: < <http://www.periodicos.capes.gov.br> >. Acesso em: 26/02/2011.

BOENI H., SILVA U., OTT D., **E-Waste Recycling in Latin America: Overview, Challenges and Potential**, 2008. Disponível em: < http://ewasteguide.info/files/2008_Keynote_Boeni_REWAS.pdf >. Acesso em: 26/02/2011.

BRAGA – LOURENCATO A. **UMA NOVA ABORDAGEM PARA A AVALIACAO DE POLITICAS DE GESTAO DE RESIDUOS PERIGOSOS: ANALISE DA EFICASSIA DINAMICA EXTENDIDA**, 2007. Repositório Institucional Universidade de Brasília. Disponível em: < <http://repositorio.bce.unb.br/handle/10482/5005?mode=full> >. Acesso em: 10/05/2012.

BRANDSTÖTTER M., KNOTH R., KOPACEK B., KOPACEK P., **Case Study of a Printed-Wire-Board Concerning (Re-) Design for Environment**, 2004. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1331572 >. Acesso em: 08/07/2011.

BRASIL - **BANCO CENTRAL DO BRASIL**. Disponível em: <<http://www4.bcb.gov.br/pec/conversao/conversao.asp> >. Acesso em: 09-03-2012).

Brasil - **CONSTITUIÇÃO DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL DE 1988**. Disponível em: < <http://www.amperj.org.br/store/legislacao/constituicao/crfb.pdf> >. Acesso em: 08/06/2012.

Brasil - **LEI ESTADUAL Nº 12.300, DE 16 DE MARÇO DE 2006**. Política Estadual De Resíduos Sólidos do Estado de São Paulo. Disponível em: <

<http://www.ambiente.sp.gov.br/legislacao/estadual/leis/2006%20Lei%2012300.pdf> >. Acesso em: 20/02/2012.

Brasil - Lei nº 13.103, de 24 de janeiro de 2001. Política Estadual dos Resíduos Sólidos do Estado do Ceará. Disponível em: <

http://lixoeletronico.org/system/files/CE_Lei_13.103_01.pdf >. Acesso em: 20/02/2012.

Brasil - LEI Nº 18.031, DE 12 DE JANEIRO DE 2009. Política Estadual de Resíduos Sólidos do Estado de Minas Gerais, 2009. Disponível em: < <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=9272> >. Acesso em: 20/02/2012.

BRASIL - Câmara Dos Deputados, 2012. Disponível em: < <http://www2.camara.gov.br> >. Acesso em: 09/03/2012.

BRASIL - Confederação Nacional dos Metalúrgicos, acesso em: < <http://www.cntm.org.br/> >. Acesso em: 07/06/2011.

BRASIL - Lei nº 11.944, de 28 de maio de 2009. Disponível em: < http://www.portalbrasil.net/salariominimo_2009.htm >. Acesso em: 20/02/2012.

BRASIL - LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010. Disponível em: < <http://www.amperj.org.br/emails/L12305.pdf> >. Acesso em: 26/02/2011.

BYUNG-CHUL C. Life Cycle Assessment of a Personal Computer and its Effective Recycling Rate, 2004. The International Journal of Life Cycle Assessment Volume 11, Number 2, 122-128, DOI: 10.1065/lca2004.12.196. Disponível em: < <http://www.springerlink.com/content/mt308q0841851748/> >. Acesso em: 26/02/2011.

Castro B. P. N., Silva C. D., Vieira A. D. **Efeitos no Homem e no ecossistema de alguns Metais Pesados: Alumínio, Mercúrio, Chumbo, Cádmiio, Arsênio, Crômio, Cobalto, Cobre e Zinco,** 2007. Disponível em : < <http://www.gratis-boeken.eu/doc/692882/efeitos-no-homem-e-ecossistema-de-alguns-metais-pesados-aluminio-mercurio-chumbo-ca%C2%A1dmio-arsa%C2%A9nio-cra%C2%B3mio-cobalto-cobre-e-zinco> >. Acesso em: 10/04/2012.

CEB - Tarifas do Grupo A – Convencional, 2012. Disponível em: < <http://www.ceb.com.br/CebNovo/arquivos/Pdf/Tarifas%20Grupo%20A%20B%20022012.pdf> >. Acesso em: 05/03/2012.

CEDIR Centro de Descarte e Reúso de Resíduos de Informática. Disponível em: < <http://www.cdi.org.br/forum/topics/ecotec-br-reciclatec-df?commentId=3004109%3AComment%3A67934> >. Acesso em: 15/02/2011).

CEEE - **Companhia Estadual de Energia Elétrica - Rio Grande do Sul**. Disponível em: < <http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/Component/Controller.aspx> >. Acesso em: 20/04/2012.

CEMPRE acesso: http://www.cempre.org.br/eletroeletronicos_page.php, acessado em: 15/03/2011.

CETIC - **A3 - PROPORÇÃO DE FUNCIONÁRIOS QUE USAM COMPUTADORES**, 2008. Disponível em: < <http://www.cetic.br/empresas/2008/c-geral-03.htm> >. Acesso em: 12/06/2012.

CETIC - **A3 - PROPORÇÃO DE FUNCIONÁRIOS QUE USAM COMPUTADORES**, 2009. Disponível em: < <http://www.cetic.br/empresas/2009/c-geral-03.htm> >. Acesso em: 12/06/2012.

CETIC – **Núcleo de Estudos sobre as Tecnologias da Informação e Comunicação**. Disponível em: < <http://www.cetic.br/> >. Acesso em: 08/07/2011.

CETIC - **Uso das Tecnologias da Informação e da Comunicação (TIC)**, 2009. Disponível em: < <http://www.cetic.br/empresas/index.htm> >. Acesso em: 06/06/2012.

Challenges to recover scarce and valuable metals from End-of-Life electronic devices, 2008. In: H. Reichl, N.F. Nissen, J. Müller and O. Deubzer (eds): *Electronics Goes Green 2008+*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2008, pp. 623-628. Disponível em: < <http://www.oecd.org/dataoecd/13/11/40798834.pdf> >. Acesso em: 08/07/2011.

CHANCEREL P. **Assessment of Precious Metal Flows During Preprocessing of Waste Electrical and Electronic Equipment**, 2009. Disponível em: < <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1530-9290.2009.00171.x/pdf> >. Acesso em: 27/02/2011.

CHI X.; STREICHER - PORTE M.; WANG Y.L. M.; REUTER A. M.; **Informal electronic waste recycling: A sector review with special focus on China**, 2010. *Waste Management* Volume 31, Issue 4, April 2011, Pages 731-742. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com> >. Acesso em: 08/02/2011.

Cleaner Production Centre and Empa, 2008. Disponível em: < http://ewasteguide.info/Wasswa_2008_UCPC-Empa >. Acesso em: 08/07/2011.

CLT - **CONSOLIDAÇÃO DAS LEIS DO TRABALHO**. Disponível em: < <http://www.sinpro.org.br/arquivos/direitos/clt.pdf> >. Acesso em: 08/06/2012.

Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE). Disponível em: < http://www.cempre.org.br/cempre_institucional.php >. acesso em: 20/02/2011.

CONNELL O. M.; FITZPATRICK C.; HICKEY S. **Investigating Reuse of B2C WEEE In Ireland**, 2008). IEEE Xplore Digital Library. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5507697&tag=1 >. Acesso em: 26/02/2011.

CONVENÇÃO COLETIVA DE TRABALHO 2011/2012, 2012 **SINDICATO DOS EMPR DE EMPR DE ASSEIO, CONSERVACAO, TRAB TEMPORARIO, PREST SERVICOS E SERV TERCEIRIZAVEIS DO DF-SINDISERVICOS/DF**, CNPJ n. 00.530.626/0001-00, neste ato representado(a) por seu Presidente, Sr(a). MARIA ISABEL CAETANO DOS REIS; E SINDICATO DAS EMPRESAS DE ASSEIO, CONSERVACAO, TRABALHOS TEMPORARIO E SERVICOS TERCEIRIZAVEIS DO DF, CNPJ n. 00.438.770/0001-10, neste ato representado(a) por seu Presidente, Sr(a). LUIZ CLAUDIO LA ROCCA DE FREITAS. Disponível em: <http://www.mte.gov.br/mediador>. Acesso em: 05/06/2012.

CORTI C. **Sustainable Recycling of Electronic Scrap**, 2010. Disponível em: < <http://www.lbma.org.uk/assets/Alch59Corti.pdf> >. Acesso em: 26/02/2011.

CUI J., FORSSBERG E. **Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review[J]**, 2003. Journal of Hazardous Materials, 99(3):2003.5:243-263. Disponível em: < http://aix.meng.auth.gr/pruwe/dhmosieuseis/mechanical_recycling.pdf >. Acesso em: 08/07/2011.

CUILING Y., LINGJUAN W., **Analyzing of the Gas Products by pyrolysis Analysis Experiment of Wasted Print Circuit Boards. China Resources Comprehensive Utilization**, 2004.

DALRYMPLE I.; WRIGHT N.; KELLNER R.; BAINS N.; GERAGHTY R.; GOOSEY M.; LIGHTFOOT L. **An integrated approach to electronic waste (WEEE) recycling**, 2007. **Circuit World [0305-6120] I. Ano: 2007 Vol: 33 Nr: 2 Pág: 52.** Disponível em: < <http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=1603492&show=html> >. Acesso em: 05/02/2011.

DIMITRAKAKIS, E, JANZ A, BILITEWSKI B, GIDARAKOS E., 2009. **Small WEEE: Determining recyclables and hazardous substances in plastics.** *Journal of Hazardous Materials*. 161:913-919.

DIRECTIVE 2002/96/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 27 January 2003. Disponível em: < <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:037:0024:0038:en:PDF> >. Acesso em: 20/02/2011.

DUAN CHEN-LONG, ZHAO YUE-MIN, HE YA-QUN, HE JING-FENG, WANG SHUAI - **Research on Fractal Mechanism of the Crushed Particle of Waste Printed Circuit Board,** 2010. Disponível em: < <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fieeexplore.ieee.org%2Fieeexplore.ieee.org%2F5513048%2F5514659%2F05516753.pdf%3Farnumber%3D5516753&authDecision=-203> >. Acesso em: 08/07/2011.

DUAN H.; EUGSTER M., HISCHIER R., STREICHER-PORTE M., LI J. **Life cycle assessment study of a Chinese desktop Personal computer,** 2008. *Science of The Total Environment* Volume 407, Issue 5, 15 February 2009, Pages 1755-1764. Disponível em: < <http://www.periodicos.capes.gov.br> >. Acesso em: 20/02/2011.

EAA/OEA RECYCLING DIVISION. **Aluminium recycling – the road to high quality products. Brussels, 2004.** Disponível em: < www.eaa.net >. Acesso em: 08/07/2011.

ECOINVENT 2.0 database. Disponível em: < <http://www.pre.nl/content/simapro-lca-software?gclid=COvXwY3k8qkCFdcJ2god501nZg> >. Acesso em: 08/07/2011.

ECOINVENT 2009. Disponível em: < <http://www.mendeley.com/research/the-ecoinvent-database-system-a-comprehensive-webbased-lca-database/> >. Acesso em: 08/07/2011.

EMPA - **Gestión de Residuos Electrónicos en Colombia Diagnóstico de Computadores y Teléfonos Celulares (2008).** Disponível em: < http://ewasteguide.info/Ott_2008_Empa-CNPMLTA >. Acesso em: 05/06/2012.

EMPA Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology. Disponível em: < <http://www.empa.ch/> >. Acesso em: 07/07/2011.

EPA US Environmental Protection Agency. Disponível em: < www.epa.gov/ >. Acesso em: 08/07/2011.

FGV – Fundação Getúlio Vargas - Custo do Trabalho no Brasil Proposta de uma nova metodologia de mensuração, 2011. Acesso em: < <http://cmicro.fgv.br/sites/cmicro.fgv.br/files/file/Custo%20do%20Trabalho%20no%20Brasil%20-%20Relat%C3%B3rio%20Final.pdf> >. Disponível em: 06/06/2012.

FGV – Fundação Getúlio Vargas. Disponível em: < <http://portal.fgv.br/> >. Acesso em: 08/07/2011.

FISHER M. M., MARK E. F., KINGSBURY T., VEHLow J., YAMAWAKI T., Energy Recovery in the Sustainable Recycling of Plastics from End-of-Life Electrical and Electronic Products, 2005. Disponível em: < http://www.americanchemistry.com/s_plastics/doc.asp?CID=1588&DID=6032 >. Acesso em: 26/02/2011.

FONSECA F. E MATIELO D. C. E-waste in Brasil - Lixo Eletrônico and MetaReciclagem, 2009. Disponível em: < <http://efeefe.no-ip.org/blog/notes-field-e-waste-brasil-lixo-eletr%C3%B4nico-and-metareciclagem> >. Acesso em: 08/07/2011.

Fonte: FGV - 23ª Pesquisa Anual do Uso de TI, 2012. Disponível em: < <http://eaesp.fgvsp.br/sites/eaesp.fgvsp.br/files/GVpesqTI2012PPT.pdf> >. Acesso em: 12/06/2012.

FRANZ M. Life Cycle Aspects of the Environmental Impact of Electrical and Electronic Equipment from the European Point of View, 2010. Disponível em: < <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fieeexplore.ieee.org%2F5540659%2F5547245%2F05547354.pdf%3Farnumber%3D5547354&authDecision=-203> >. Acesso em: 08/07/2011.

FREDHOLM A. S., GREGORY R. J., KIRCHAIN E. R. Characterizing Architectural Options for Electronic Waste Recycling Systems, 2008. Disponível em: < <http://msl.mit.edu/pubs/docs/FredholmISEE2008CharacterizingOptionsEwaste-IEEE2008.pdf> >. Acesso em: 24/02/2011.

FÜHR M., ROLLER G. Individual Producer Responsibility: A Remaining Challenge under the WEEE Directive, 2008. Review of European Community &

International Environmental Law Volume 17, Issue 3, pages 277–283, December 2008. Disponível em: < <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1467-9388.2008.00606.x/abstract> >. Acesso em: 26/02/2011.

GENEVOIS E. M., BERKETLI I. **Green Product Design for EEE**, 2009. Disponível em: < <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5223896> >. Acesso em: 18/02/2011.

GEORGALLI **The metrics of material and metal ecology**. Amsterdam: Elsevier, 2005.

GEORGIADIS P.; BESIOU M. **Environmental and economical sustainability of WEEE Closed –loop supply chains with recycling: as system Dynamics analysis**, 2008. Environmental and economical sustainability of WEEE Closed –loop supply chains with recycling: as system Dynamics analysis. Disponível em: < <http://www.springerlink.com/content/j5381325n068041j/> >. Acesso em: 10/01/2011.

GMÜNDER S., STREICHER-PORTE M., HELLWEG S. **RECYCLING - FROM WASTE TO RESOURCE Assessment of optimal manual dismantling depth of a desktop PC in China based on eco-efficiency calculations**, 2007. Disponível em: < http://ewasteguide.info/files/Gmuender_2007_ETHZ-EMPA.pdf >. Acesso em: 26/02/2011.

GOODMAN P. **Current and Future Hazardous Substance Legislation Affecting Electrical and Electronic Equipment**, 2008. Review of European Community & International Environmental Law Volume 17, Issue 3, pages 259–267, December 2008. Disponível em: < <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1467-9388.2008.00609.x/abstract> >. Acesso em: 26/02/2011.

GOODMAN P. **Electronic waste and organized crime-assessing the links**, 2009, P.362). Disponível em: < <https://www.interpol.int/Public/ICPO/FactSheets/Wastereport.pdf> >. Acesso em: 27/02/2011.

GOOSEY M. AND KELLNER R. **A Scoping Study End-of-Life Printed Circuit Boards**. Disponível em: <

GULLETT K. B.; LINAK P. W.; Touati A.; Wasson J. S.; Gatica S.; King J. C. **Characterization of air emissions and residual ash from open burning of electronic wastes during simulated rudimentary recycling operations**, 2006. Journal of Material

Cycles and Waste Management Volume 9, Number 1, 69-79, DOI: 10.1007/s10163-006-0161-x. Disponível em: < <http://www.springerlink.com/content/c23778712p6x66j6/> >. Acesso em: 18/02/2011.

GUO - JIAN Z.; XIONG - BAO D.; RUI-XIA Z. **Application of Genetic Algorithms for the Design of WEEE Logistics Network Model**, 2010. Disponível em: < <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5655008> >. Acesso em: 02/02/2011.

GUODONG Z.; YONG L.; XING J.; RONGBIN L.; XING J. **Seismic Response Analysis of Municipal Solid Waste Landfill**, 2009. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5367038 >. Acesso em: 24/02/2011.

HAGELUKEN, C., M. BUCHERT AND H. STAHL. 2005. **Materials flow of platinum group metals**. Umicore AG &Co. KGand O`ko-Institut e.V. London: GFMS Limited.

HAI-YONG K., JULIE M. S. **Economic Analysis of Electronic Waste Recycling: Modeling the Cost and Revenue of a Materials Recovery Facility in California**, 2006. Environmental Science & Technology. Disponível em: < <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es0503783> >. Acesso em: 25/02/2011.

HALL, W.J., WILLIAMS, P.T.: **Separation and recovery of materials from scrap printed circuit boards**. *Resour. Conserv. Recycl.* 51, 691–709 (2007). Disponível em: < <http://www.mendeley.com/research/separation-recovery-materials-scrap-printed-circuit-boards-1/> >. Acesso em: 08/07/2011.

HATVALNE **Toxic Tech: Not in Our Backyard Uncovering the Hidden Flows of e-Waste**, (2008). Disponível em: < <http://www.greenpeace.org/sweden/se/rapporter-och-dokument/not-in-our-backyard/> >. Acesso em: 26/02/2011.

HE W., LI G., MA X., WANG H., HUANG J., XU X., HUANG C. **WEEE recovery strategies and the WEEE treatment status in China**. In: **Journal of Hazardous Materials B136**, 2006). *Journal of Hazardous Materials B136* (2006) 502–512. Disponível em: < <http://infolib.hua.edu.vn/Fulltext/ChuyenDe2009/CD131/27.pdf> >. Acesso em: 05/01/2011.

HICKS C., DIETMAR R., EUGSTER M. **The recycling and disposal of electrical and electronic waste in China—legislative and Market responses**, 2005. Disponível em: < http://ewasteguide.info/Hicks_2005_EIAR >. Acesso em: 26/02/2011.

HOBBY C. **IT Products. Going Beyond Green - Can High Performance and Sustainability Co-exist?**, 2009). Disponível em: < <http://www.periodicos.capes.gov.br> > . Acesso em: 27/02/2011.

IBGE – **CENSO 2998-2010**. Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br/home/download/estatistica.shtm> >. Acesso em: 06/06/2012.

IBGE - **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, disponível em: < <http://www.ibge.gov.br> > . Acessado em: 11/05/2011.

IBGE - **Síntese de Indicadores**. Disponível em: < http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/trabalhoerendimento/pnad2009/sintese_defaultpdf_domicilios.shtm >. **Acesso em: 06/06/2012.**

IBGE - **Unidades locais, pessoal ocupado total e assalariado**. Disponível em: < http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/cadastroempresa/2009/defaulttabpdf_unidade.shtm >. Acesso em: 06/06/2012.

IDC - **International Data Corporation**, acesso em: < http://www.idclatin.com/news.asp?ctr=bra&id_release=1918 > . Acessado em 09/05/11.

INTERPOL **Electronic waste and organized crime-assessing the links**, 2009. Disponível em: < <http://www.interpol.int/public/icpo/factsheets/wastereport.pdf> >. Acesso em: 17/02/2011.

ITAUTEC **Sustentabilidade**. Disponível em: < <http://www.itaute.com.br/pt-br/sustentabilidade/ti-verde/centro-de-reciclagem> > acesso em: 05-03-2012).

JACKSON, E. **Hidrometallurgical extraction e reclamation**. Ellis Horwood Limited, New York, 1986.

JAIN A. **Developments and Evaluation of Existing Policies and Regulations for E-waste in India**, 2009. IEEE Xplore Digital Library. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5156687&tag=1 >. Acesso em: 26/02/2011.

JANSE B., SCHUUR P., BRITO P. M. **A reverse logistics diagnostic tool: the case of the consumer Electronics industry**, 2009. Disponível em: < The International Journal of Advanced Manufacturing Technology Volume 47, Numbers 5-8, 495-513, DOI: 10.1007/s00170-009-2333-z >. Acesso em: 27/02/2011.

JOLLIET O., MARGNI M., CHARLES R., HUMBERT S., PAYET J., REBITZER G., ROSENBAUM R. **IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology**, 2003.

JÖNBRINK K. A. AND ZACKRISSON M. **Personal Computers (desktops and laptops) and Computer Monitors Draft Final Report (Task 1-7)**, 2007. Disponível em: < <http://extra.ivf.se/ecocomputer/downloads/EuP%20Lot%203%20Task%201-7,%20draft%20report.pdf> >. Acesso em: 08/07/2011.

KAHHAT F. R.; KAVAZANJIAN E. Preliminary Feasibility Study on the Use of Mono-disposal Landfills for E-waste as Temporary Storage for Future Mining, 2010. **Sustainable Systems and Technology (ISSST), 2010 IEEE International Symposium on [978-1-4244-70] Kahhat Ano:2010 Pág:1 -5.** Disponível em: < <http://www.periodicos.capes.gov.br> >. Acesso em: 02/02/2011.

KAHHAT R. WILLIAMS E. **Productor Waste? Importation and End-of-Life Processing of Computers In Peru**, 2009. Disponível em: < <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es8035835> >. Acesso em: 26/02/2011.

KELLER M. **ASSESSMENT OF GOLD RECOVERY PROCESSES IN BANGALORE, INDIA AND EVALUATION OF AN ALTERNATIVE RECYCLING PATH FOR PRINTED WIRING BOARDS**, 2006. Disponível em: < http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/59244/---/l=2 >. Acesso em: 01/04/2012.

KOJIMA M., YOSHIDA A., SASAKI S. **Difficulties in applying extended producer responsibility policies in developing countries: case studies in e-waste recycling in China and Thailand, 2008.** Journal of Material Cycles and Waste Management Volume 11, Number 3, 263-269, DOI: 10.1007/s10163-009-0240-x. Disponível em: < <http://www.springerlink.com/content/qr301r4781272806/> >. Acesso em: 26/02/2011.

KRIKKE J. **Recycling e-Waste: The Sky Is the Limit** , 2008. Disponível em:

LAWHON M., MANOMAIVIBOOL P., INAGAKI H. - **Solving/understanding/evaluating the e-waste challenge through transdisciplinarity?**, 2010. Disponível em: < <http://www.alumni.lu.se/o.o.i.s?id=12570&postid=1731498> >. Acesso em: 27/02/2011.

LEITE R. P., LAVEZ N., SOUZA M. V. **FATORES DA LOGÍSTICA REVERSA QUE INFLUEM NO REAPROVEITAMENTO DO “LIXO**

ELETRÔNICO” UM ESTUDO NO SETOR DE INFORMÁTICA, 2009. Disponível em: < http://www.simpoi.fgvsp.br/arquivo/2009/artigos/E2009_T00166_PCN20771.pdf >. Acesso em: 26/02/2011.

LEUNG A., WEI – CAI Z., WONG H. M. **Environmental contamination from electronic waste recycling at Guiyu, southeast China**, 2005). Journal of Material Cycles and Waste Management Volume 8, Number 2, 154, DOI: 10.1007/s10163-006-0002-y. Disponível em: < <http://www.springerlink.com/content/d5440088jpl31p51/> >. Acesso em: 26/02/2011.

Li J., Xu Z. **Environmental Friendly Automatic Line for Recovering Metal from Waste Printed Circuit Boards**, 2010. Disponível em: < <http://www.mendeley.com/research/line-recovering-metal-waste-printed-circuit-boards/> >. Acesso em: 08/09/2011.

LI, J., SHRIVASTAVA, P., GAO, Z., ZHANG, H.C.: **Printed circuit board recycling: a state-of-the-art survey**. IEEE Trans. Electron. Packag. Manuf. 27, 33–42 (2004). Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1331573 >. Acesso em: 08/07/2011.

LIU X.; TANAKA M.; MATSUI Y. **Electrical and electronic waste management in China: progress and the barriers to overcome**, 2006. Disponível em: < <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd37/92.pdf> >. Acesso em: 26/02/2011.

LIXO ELETRÔNICO. < Disponível em: <http://www.lixoeletronico.org/blog/municipio-de-sao-paulo-vanguarda-na-legislacao-de-eletronicos> >. Acesso em: 20/01/2011.

LOERINCIK Y. **ENVIRONMENTAL IMPACTS AND BENEFITS OF INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGY INFRASTRUCTURE AND SERVICES, USING PROCESS AND INPUT-OUTPUT LIFE CYCLE ASSESSMENT**, 2006. Disponível em: < http://biblion.epfl.ch/EPFL/theses/2006/3540/EPFL_TH3540.pdf >. Acesso em: 10/02/2011.

LONDON METAL EXCHANGE – **LME Copper**, 2012. Disponível em: < <http://www.lme.com/copper.asp> >. Acesso em: 10/06/2012.

M U S S O N E. S., VANN N. K., GANG Y., MUTHA S., JORDAN A., PEARSON B., TOWNSEND T. G. **RCRA Toxicity Characterization of Discarded Electronic Devices, 2006.** Disponível em: <

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16683614> >. Acesso em: 08/07/2011.

MAEDA, H.; YAMAMOTO, K. **Evaluation of the environmental acceptability and efficiency of resource recovery from products container circuit board in personal computers. Master's thesis. Tokyo University, 2002.**

MAGALINI F.; HUISMAN J. **Management of WEEE & Cost Models across the EU Could the EPR principle lead US to a better Environmental Policy?, 2007.** Disponível em: < <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4222872> >. Acesso em: 01/02/2011.

MANHART A. **International Cooperation for Metal Recycling From Waste Electrical and Electronic Equipment, 2010.** Journal of Industrial Ecology Volume 15, Issue 1, pages 13–30, February 2011. Disponível em: < <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1530-9290.2010.00307.x/full> >. Acesso em: 26/02/2011.

MAYERS K. C., FRANCE M. C., COWELL J. S. **Extended Producer Responsibility for Waste Electronics: An Example of Printer Recycling in the United Kingdom, 2005.** Journal of Industrial Ecology Volume 9, Issue 3, pages 169–189, July 2005.

MEDEIROS O. S. N. **DIAGNÓSTICO DOS RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS, COMPUTADORES, GERADOS NO MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA), 2011.**

Microelectronics and Computer Technology Corporation (MCC) - **Valuable Substances in e-waste, 1996.** Acesso em < http://ewasteguide.info/valuable_materials_in_e_waste >. Acessado em 08/05/2011.

MONIT J. E., **Climbing the e-waste mountain, 2005**, 933. Disponível em: < <http://pubs.rsc.org/en/Content/ArticleLanding/2005/EM/b512172h> >. Acesso em: 26/02/2011.

MORAIS V. T, **RECUPERAÇÃO DE METAIS A PARTIR DO PROCESSAMENTO MECÂNICO E HIDROMETALÚRGICO DE PLACAS DE**

CIRCUITO IMPRESSO DE CELULARES OBSOLETOS, 2011. Disponível em: < www.teses.usp.br >. Acesso em: 30/04/2012.

NIU Q., LIU X., SHI C., XIANG D., DUAN G. **The Recycle Model of Printed Circuit Board and Its Economy**, 2007. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4222865 >. Acesso em: 08/07/2011.

NNOROM I. C., OSIBANJO O., OGWUEGBU M.O.C. **Global disposal strategies for waste cathode ray tubes**, 2011). Disponível em: < <http://ewasteguide.info/biblio/global> >. Acesso em: 26/02/2011.

OGUNSEITAN A. O. **The Electronics Revolution: From E-Wonderland to E-Wasteland**, 2009. Science 30 October 2009: Vol. 326 no. 5953 pp. 670-671 DOI: 10.1126/science.1176929. Disponível em: < <http://www.sciencemag.org/content/326/5953/670.summary> >. Acesso em: 26/02/2011.

OGUSHI Y., KANDLIKAR M. **Assessing Extended Producer Responsibility LAWS in JAPAN**, 2007. Disponível em: < http://www.kerstinstrom.com/wp-content/uploads/2009/05/eprinjapan2007_ogushi.pdf >. Acesso em: 26/02/2011.

OHASHI H. **Role of Green Electronics in Low Carbonated Society toward 2030**, 2010). Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5606701&tag=1 >. Acesso em: 27/02/2011.

OLIVEIRA M. M. W. **Movimentos Transfronteiriços e Disposição de Resíduos de equipamentos Eletroeletrônicos**, 2010. Disponível em: < http://issuu.com/recicloambiental/docs/marcus_oliveira_fgv_e-waste >. Acessível em: 08/07/2011.

OLIVEIRA R.C., **Alternativas Tecnológicas para o Tratamento e Reciclagem do Lixo de Informática**, 2010. Disponível em: < <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/28926/000773075.pdf?sequence=1> >. Acesso em: 20/02/2012.

ONGONDO O. O., WILLIAMS D. I., CHERRETT J. T. **How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes**, 2010. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X10005659> >. Acesso em: 10/06/2012.

PAPAOIKONOMOU K., KIPOUROS S., KUNGOLOS A., SOMAKOS L., ARAVOSSIS K., ANTONOPOULOS I., KARAGIANNIDIS A. **Marginalised social groups in contemporary waste management Within social enterprises investments: A study in Greece**, 2008. Waste Management Volume 29, Issue 5, May 2009, Pages 1754-1759. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com> >. Acesso em: 15/02/2011.

PNUMA no Brasil Disponível em: < <http://www.pnuma.org.br/> >. Acesso em: 08/07/2011.

RAMESH-BABU B., KUBER – PARANDE A., AHMED- BASHA C. **Electrical and electronic waste: a global environmental problem**, 2007. Disponível em: < <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17874657> > Acesso em: 01/02/2011.

RAVI V. **Evaluating Overall Quality of Recycling of E-Waste from End-Of-Life Computers, 2011**. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652611003039> >. Acesso em: 19/08/2011.

ROCHA **Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos**, 2009 Disponível em: < <http://www.minassemlixoes.org.br/wp-content/uploads/2010/11/Eletronicos.pdf> >. Acesso em: 08/07/2011.

RYAN A., DONOGHUE O., LEWIS H. **Characterising Components of Liquid Crystal Displays To Facilitate Disassembly**, 2010. Disponível em: < <http://www.citeulike.org/user/LuisWest/article/8712909> >. Acesso em: 26/02/2011.

SARKIS J., MICHELLE – HELMS M., HERVANI A. A. **Reverse Logistics and Social Sustainability, 2010. Corporate Social Responsibility and Environmental Management Volume 17, Issue 6, pages 337–354**. Disponível em: < <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/csr.220/full> >. Acesso em: 05/02/2011.

SCHLUEP M., HAGELUEKEN C., KUEHR R., MAGALINI F., MAURER C., MESKERS C., MUELLER E., WANG F., (UNEP – United Nations Environment Programme) – **Sustainable Innovation and Technology Transfer Industrial Sector Studies (RECYCLING – FROM E-WASTE TO RESOURCES, 2009)**. Disponível em: < http://ewasteguide.info/files/UNEP_2009_eW2R.PDF > Acesso em: 20/02/2011.

SILVA D. B., MARTINS D. L., OLIVEIRA F. C., **RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS NO BRASIL**, 2008. Disponível em: <

http://www.lixoeletronico.org/system/files/lixoeletronico_02.pdf >. Acesso em: 26/02/2011.

SILVA G. U. D. **Guía de contenidos legales para la gestión de los residuos electrónicos**, 2010. Disponível em: <

<http://www.lixoeletronico.org/system/files/guia+legal+04++FIN.pdf> >. Acesso em: 26/02/2011.

SPALVINS E., DUBEY B., TOWNSEND T., **Impact of Electronic Waste Disposal On Lead Concentrations in Landfill Leachate**, 2008. Disponível em: < <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es8009277> >. Acesso em: 26/02/2011.

STEUBING B., HEINZ BÖNIA H.,SCHLUEP M.,SILVA U., LUDWIG C. **Assessing computer waste generation in Chile using material flow analysis**, 2009. Disponível em: < http://ewasteguide.info/Steubing_2010_WasteMgmt >. Acesso em: 08/07/2011.

STREICHER-PORTE M. **SWICO/S.EN.S, the Swiss WEEE recycling systems, and best practices from other European systems**, 2006. Disponível em: < <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1650077&userType=inst> >. Acesso em: 20/02/2011.

STREICHER-PORTE M., ANNE-CATHERINE G. **Opportunities and Threats of Current E-Waste Collection System in China: A Case Study from Taizhou with a Focus on Refrigerators, Washing Machines, and Televisions**, 2009. Disponível em: < http://www.ewasteguide.info/files/Streicher_2010_EES.pdf >. Acesso em: 26/02/2011.

SWISS Center for Life Cycle Inventories. **EcoInvent Data v2.0. 2006**. Disponível em: < <http://www.ecoinvent.ch/> >. Acesso em: 08/07/2011.

TERAZONO, A., MURAKAMI S., ABE N., INANC B., MORIGUCHI Y., SAKAI S-ICHI, KOJIMA M., YOSHIDA A., LI J., YANG J. et al. 2006. **Current status and research on E-waste issues in Asia**. Journal of Material Cycles & Waste Management. Disponível em: < <http://ewasteguide.info/biblio/author/10> >. Acesso em: 08/07/2011.

The Global Aluminium Recycling Committee **Global aluminium recycling: a cornerstone of sustainable development**. London: International Aluminium Institute, 2006.

TOWNSEND G. T., MUSSON E. S. **Assessing the Landfill Disposal Implication of Discarded Electronic Equipment**, 2006. Disponível em: <

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1650080&userType=inst> >. Acesso em: 26/02/2011.

TSYDENOVA O., BENGTTSSON M. **Chemical hazards associated with treatment of waste electrical and electronic equipment**, 2010. Institute for Global Environmental Strategies, 2108-11 Kamiyamaguchi, Hayama, Kanagawa 240-0115, Japan. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com> >. Acesso em: 25/02/2011.

UENO T., SHIINO T., ONISHI H. **Evaluation of electronic components in life cycle assessment**, 1999. < Journal of Material Cycles and Waste Management Volume 1, Number 1, 25-32, DOI: 10.1007/s10163-999-0002-9. Disponível em: < <http://www.springerlink.com/content/5469yhvmevwa2xu5/> >. Acesso em: 19/02/2011.

UNEP – United Nations Environment Programme – **Sustainable Innovation and Technology Transfer Industrial Sector Studies (RECYCLING – FROM E-WASTE TO RESOURCES**, 2009). Disponível em: < http://ewasteguide.info/files/UNEP_2009_eW2R.PDF > Acesso em: 20/02/2011.

VEIT M. H. **Reciclagem de Cobre de Sucatas de Placas de Circuito Impresso**, 2005. Disponível em: < <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/6530> >. Acesso em: 08/07/2011.

VOLSKY, A. E SERGIEVSKAYA, E. **Theory of metallurgical processes**. Mir Publishers: Moscow, 1978.

WAEMA, T, MUREITHI M. 2008. **E-waste Management in Kenya. HP / DSF / Empa project "e-Waste Management in Africa"**. Disponível em: < <http://ewasteguide.info/biblio/author/791> > . Acesso em: 08/07/2011.

WALTHER G.; STEINBORN J.; SPENGLER S. T.; LUGER T.; HERRMANN C. **Implementation of the WEEE - directive—economic effects and improvement potentials for reuse and recycling in Germany**, 2009. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology Volume 47, Numbers 5-8, 461-474, DOI: 10.1007/s00170-009-2243-0. Disponível em: < <http://www.springerlink.com/content/3gx021p4n21m1074/> >. Acesso em: 10/02/2011.

WASSWA J. **e-Waste Assessment in Uganda**, 2008. Disponível em: < http://ewasteguide.info/files/Wasswa_2008_UCPC-Empa.pdf >. Acesso em: 26/02/2011.

WATI Y.; KOO C. **The Green IT Practices of Nokia, Samsung, Sony, and Sony Ericsson: Content Analysis Approach**, 2010. Disponível em: <

<http://www.computer.org/portal/web/csdl/doi/10.1109/HICSS.2010.480> >. Acesso em: 05/02/2011.

WILLIAMS D. E. **Energy Analysis of End-of-life Options for Personal Computers: Resell, Upgrade, Recycle**, 2003. Disponível em: < <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1208072&userType=inst> >. Acesso em: 08/07/2011.

WILLIAMS D. E. **Revisiting energy used to manufacture a desktop computer: hybrid analysis combining process and economic input-output methods**, 2004. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1299692 >. Acesso em: 08/07/2011.

WILLIAMS E., KAHN R., ALLENBY B., KAVAZANJIAN E., XU M., KIM J. **Sustainability review of the international reverse chain for reuse and recycling of computers**, 2008. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4562927 >. Acesso em: 27/02/2011.

YANG W. **Regulating Electrical and Electronic Wastes in China**, 2008. Review of European Community & International Environmental Law Volume 17, Issue 3, pages 335–344, December 2008. Disponível em: < <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1467-9388.2008.00608.x/full> >. Acesso em: 26/02/2011.

YIİKSEL H. **An Analytical Hierarchy Process Decision Model for E-Waste Collection Center Location Selection**, 2009. Disponível em: < <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=05223889> >. Acesso em: 26/02/2011.

YOSHIDA F., YOSHIDA H. **Japan, the European Union, and Waste Electronic And Electrical Equipment Recycling: Key Lessons Learned**, 2009. Disponível em: < <http://www.liebertonline.com/doi/pdf/10.1089/ees.2009.0109> >. Acesso em: 26/02/2011.

YU J. **Forecasting Global Generation of Obsolete Personal Computers**, 2009. *Environmental science & technology* [0013-936X] Jinglei Ano:2010 Vol:44 Nr:9 Pág:3232 -3237. Disponível em: < <http://www.periodicos.capes.gov.br> >. Acesso em: 02/02/2011.

YU J.; WELFORD R.; HILLS P. **Industry Responses to EU WEEE and ROHS Directives: Perspectives from China**, 2006. Corporate Social Responsibility and

Environmental Management Volume 13, Issue 5, pages 286–299, December 2006.
Disponível em: < <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/csr.131/abstract> >. Acesso em: 27/02/2011.

ZHOU X., NIXON H., OGUNSEITAN A. O., SHAPIRO A. A., SCHOENUNG J. M. **Transition to Lead Free Products in the US Electronics Industry: A Model of Environmental, Technical, and Economic Preferences**, 2010. Environmental Modeling and Assessment Volume 16, Number 1, 107-118, DOI: 10.1007/s10666-010-9227-1. Disponível em: < <http://www.springerlink.com/index/981vn0x328201586.pdf> >.

ZOETEMAN C.J. B., KRIKKE R. H., VENSELAAR J. **Handling WEEE waste flows: on the effectiveness of producer responsibility in a globalizing world**, 2009. Handling WEEE waste flows: on the effectiveness of producer responsibility in a globalizing world. Disponível em: < <http://www.springerlink.com/content/ag8m1702x41677n7/> >. Acesso em: 07/02/2011.