

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRAULIA E SANEAMENTO**

RITA GABRIELA FERNANDES

**ESTUDO DE TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO DE
METAIS DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS
ELETROELETRÔNICOS**

São Carlos, SP

2014

RITA GABRIELA FERNANDES

**ESTUDO DE TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO DE
METAIS DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS
ELETROELETRÔNICOS**

Trabalho de Graduação apresentada à
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Engenheira Ambiental.

Orientador:

Prof. Dr. Eduardo Cleto Pires

São Carlos, SP

2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

F363e Fernandes, Rita Gabriela
 Estudo de técnicas de recuperação de metais de
 resíduo de equipamento eletroeletrônico / Rita Gabriela
 Fernandes; orientador Eduardo Cleto Pires. São Carlos,
 2014.

 Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) --
 Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
 São Paulo, 2014.

 1. recuperação de metais. 2. resíduo de equipamento
 eletroeletrônico. 3. reciclagem de lixo eletrônico. 4.
 resíduos sólidos. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): Rita Gabriela Fernandes

Data da Defesa: 29/10/2014

Comissão Julgadora:

Resultado:

Eduardo Cleto Pires (Orientador(a))

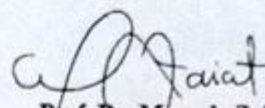
Aprovado

Valdir Schalch

APROVADO

Nivaldo Aparecido Correa

Aprovado



Prof. Dr. Marcelo Zaiat

Coordenador da Disciplina 1800091 - Trabalho de Graduação

Dedico esse trabalho ao meu avô, seu Ary falecido recentemente, por ter sido a minha maior fonte de inspiração na carreira e por ter sido o maior engenheiro sem formação formal que conheci.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente minha família, que foi minha base e permitiu para que eu chegasse nesse momento de minha vida.

A minha mãe, Mary, por todo amor e força, por sempre ter confiado e acreditado em mim, por dar dado apoio em todas minhas escolhas, e ter sido uma estrutura forte na minha vida, permitindo que eu seguisse mesmo com dificuldades.

A minha avó, dona Eni, por ter sido meu maior exemplo de força, bondade, mulher e mãe. Por todo amor, carinho, dedicação e cuidado que sempre teve comigo e com meus irmãos. Por todos os valores que me ensinou.

A minha irmã Ariana, por sempre ter me dado força e apoio, por me ajudar em tantas horas, e nunca me deixar cair.

Ao meu pai, pelo apoio e cuidado que tem comigo. Por ter sido minha maior estrutura este ano.

A minha florzinha, irmã Sol, por ser a luz de nossas vidas, por sempre trazer alegria, muito carinho e muito amor.

E ao meu irmão, por ser o ponto criativo e sonhador da família, sempre me ensinado a nunca desistir dos meus sonhos.

Aos queridos amigos da faculdade, que sempre me apoiaram e me ajudaram nessa caminhada, para construção da pessoa e profissional que sou hoje. Em especial a Isabela, por toda amizade sincera, apoio, força, ouvidos para escutar minhas reclamações, por sua serenidade que sempre acalmou em momentos difíceis.

Aos queridos da rep Horta Feliz, pelas inúmeras estadias, rangos saudáveis e não saudáveis, as noites de risadas e cervejas, pelo acolhimento e carinho que sempre me deram. Principalmente a Marianinha, pelos anos de amizade, diversão, compreensão, obrigada.

Aos professores que me ajudaram muito neste processo. Em especial ao meu querido orientador Eduardo Cleto Pires, pela paciência, dedicação e por nunca ter desistido de mim, por mais que eu mesma não acreditasse mais.

Aos funcionários da EESC e SHS, que sempre estavam dispostos a me ajudar. Principalmente ao Joãozinho e a Rose.

A todos, e a muitos outros que não consegui citar, muito obrigado por terem passado na minha vida, e feito parte da minha caminhada.

*"Para ser grande, sê inteiro: nada
Teu exagera ou exclui.
Sê todo em cada coisa. Põe quanto és
No mínimo que fazes.
Assim em cada lago a lua toda
Brilha, porque alta vive."*

14/2/1933

Ricardo Reis

heterônimo de Fernando Pessoa

RESUMO

FERNANDES, R. G. **Estudo de técnicas de recuperação de metais de resíduo de equipamento eletroeletrônico**. 2014. 80p. Monografia (Graduação) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2014.

O consumo de produtos eletroeletrônicos aliado ao avanço tecnológico favorece a troca constante desses equipamentos, mesmo que não tenham finalizado sua vida útil. O problema que enfrentamos na atualidade é o que fazer com esse volume crescente de eletroeletrônicos descartados? A disposição desse material juntamente com os resíduos domiciliares é uma prática muito comum, mas traz consequências graves para o ambiente e a saúde da população, devido grande variedade de metais e outros compostos perigosos. Este trabalho fez um levantamento, descreveu e discutiu as técnicas mais aplicadas na recuperação de metais de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos. Também foi apresentado um estudo dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos que têm por objetivo caracterizar esse tipo de resíduo quanto a sua composição química, verificando a presença ou não de substâncias perigosas à saúde ambiental e humana. Para isso foram levantados diversos estudos com aplicação de técnicas da metalurgia para tratamento e extração de metais dos REEE. Os procedimentos estudados foram os processos mecânicos, eletrometalúrgicos, pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos e biohidrometalúrgicos. Concluiu-se com o estudo, que para obter maior eficiência na extração de metais de REEE, deve ser aplicado um conjunto de procedimentos, combinando duas ou mais técnicas metalúrgicas; é importante realizar previamente a caracterização do material a ser recuperado para determinar o melhor procedimento; e que as técnicas biohidrometalúrgicas e hidrometalúrgicas, são as consideradas mais “limpas” e com os menores custos.

Palavras-chave: recuperação de metais, resíduo de equipamento eletroeletrônico, reciclagem de lixo eletrônico e resíduos sólidos.

ABSTRACT

FERNANDES, R. G. **Study of recovery of metals from waste electrical and electronic equipment**. 2014. 80p. Monograph (Graduation) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2014.

The consumer of electronics products coupled with technological advances favors the constant exchange of such equipment, even if they have not completed their useful life. The problem we face today is what to do with this increasing volume of electronics discarded? The disposal of this material together with household waste is a very common practice, but bring serious consequences for the environment and the health of population, because wide variety of metals and other hazardous compounds. This study surveyed, described and discussed the techniques applied in the recovery of metal from electronic waste. It was also presented a study of electronic waste that are intended to characterize this type of waste as its chemical composition, verifying the presence or absence of hazardous substances to the environment and human health. Several studies with application of metallurgy techniques for treatment and extraction of metals from WEEE were collected. The procedures studied were: mechanical processes, eletrometalúrgicos, pyrometallurgical, hydrometallurgical and biohidrometalúrgicos. In conclusion to the study, for more efficient extraction of metals WEEE should be applied a set of procedures, combining two or more metallurgical techniques; is important previously to characterize the material to be recovered to determine the best procedure; and that biohidrometalúrgicas and hydrometallurgical techniques, are considered more "clean" and at the lowest cost.

Keywords: metal recovery, waste electrical and electronic equipment, e-waste recycling and solid waste.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS SEGUNDO A ORIGEM. ..	30
FIGURA 2 - CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS SEGUNDO SUA ORIGEM.....	32
FIGURA 3 - QUADRO COM AS ETAPAS DO CICLO DE VIDA DOS EEE.	35
FIGURA 4 - GRÁFICO COMPOSIÇÃO DE REEE SEGUNDO EUROPEAN TOPIC CENTER, 2006 (PESO - %).	40
FIGURA 5 - GRÁFICO DA QUANTIDADE DE REEE GERADO A PARTIR DE COMPUTADORES PESSOAIS (KG/HAB.ANO) EM DIVERSOS PAÍSES.	45
FIGURA 6 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DO PROCESSO UTILIZADO POR VEIT, 2005.	65

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CATEGORIAS DE EEE DE ACORDO COM A DIRETIVA DA UNIÃO EUROPÉIA.	37
TABELA 2 - COMPONENTES PERIGOSOS NO REEE.	41
TABELA 3 - COMPOSIÇÃO DE UM PC - COMPUTADOR PESSOAL.	42
TABELA 4 - SUBSTÂNCIAS TÓXICAS RELEVANTES UTILIZADAS NOS EEE/EFEITOS NA SAÚDE.	43
TABELA 5 - FATORES E PARÂMETROS QUE PODEM INFLUENCIAR A LIXIVIAÇÃO MICROBIANA.	55
TABELA 6 - RESUMO DOS TRABALHOS DE RECUPERAÇÃO DE METAIS DE REEE ESTUDADOS.	66
TABELA 7 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE METALURGIA NA RECUPERAÇÃO DE METAIS DE REEE.	68

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira Registrada
EEE	Equipamento Eletroeletrônico
REEE	Resíduo de Equipamento Eletroeletrônico
RS	Resíduo Sólido
PCI	Placa de Circuito Impresso
CCE	Comissão da Comunidade Européia

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
2	OBJETIVOS	25
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS	26
3.1.1	<i>Definição de Resíduos Sólidos</i>	26
3.1.2	<i>Classificação dos Resíduos Sólidos</i>	27
3.1.3	<i>Reciclagem.....</i>	32
3.2	RESÍDUOS SÓLIDOS E A QUESTÃO AMBIENTAL	34
3.3	RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS (REEE)	36
3.3.1	<i>Composição do Resíduo de Equipamentos Eletroeletrônico</i>	39
3.3.2	<i>Geração de Resíduo de Equipamentos Eletroeletrônico.....</i>	45
3.4	LEGISLAÇÃO SOBRE RESÍDUO DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICO	46
3.5	TIPOS DE TRATAMENTO DO RESÍDUO DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICO.....	49
3.5.1	<i>Processamento mecânico.....</i>	50
3.5.2	<i>Pirometallurgia</i>	52
3.5.3	<i>Hidrometalurgia</i>	53
3.5.4	<i>Processo biohidrometalúrgico.....</i>	54
3.5.5	<i>Eletrometalurgia</i>	55
4	METODOLOGIA.....	57
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	58
5.1	RESULTADOS.....	58
5.1.1	<i>Processos mecânicos</i>	58
5.1.2	<i>Pirometalurgia</i>	59
5.1.3	<i>Hidrometalurgia</i>	60
5.1.4	<i>Biometalurgia</i>	63
5.1.5	<i>Eletrometalurgia</i>	64
5.2	RESUMO DOS TRABALHOS ESTUDADOS	66
5.3	VANTAGENS E DESVANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DOS PROCESSOS ESTUDADOS	68
5.4	DISCUSSÃO	69
6	CONCLUSÕES.....	71
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

1 INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios com que se defronta a sociedade atual é o equacionamento da questão do lixo. 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 desenvolvimentos adotados e da mudança nos padrões de consumo (Andrade, 2002).

Após 1950 houve uma grande explosão consumista, o que acabou criando a sociedade do descartável, tendo como principal estratégia por parte das organizações a obsolescência programada. As pessoas aprendem a desperdiçar, a usar e descartar bens de todos os tipos. Tal atitude vem desencadeando problemas ambientais que estão mobilizando pesquisadores e autoridades do mundo inteiro na busca por soluções.

Essa forte onda de consumo, juntamente com o crescimento populacional, e aliado à intensa urbanização acarreta a concentração da produção de imensas quantidades de resíduos e a existência cada vez menor de áreas disponíveis para a disposição desses materiais. Juntam-se a esses fatos, as questões institucionais, que tornam cada vez mais difícil para os municípios dar um destino adequado ao lixo produzido.

Dentro desse panorama, o resíduo que tem sido alvo de maior preocupação é o de equipamentos eletroeletrônico devido ao seu grande potencial poluente, devido à presença de metais, e de outros componentes, que são prejudiciais à saúde humana.

Uma das principais consequências da dinâmica do rápido e crescente consumo e descarte dos equipamentos eletroeletrônicos, além dos impactos do pós-consumo, é a utilização maciça e contínua de recursos naturais não renováveis e o consumo total de energia (RODRIGUES, 2007).

Com isso, é cada vez maior a necessidade de se encontrar formas de tratamento para esses resíduos a fim de reduzir os impactos gerados por sua disposição inadequada, e reaproveitar seus componentes como matéria prima para novos equipamento evitando assim a extração na natureza.

As técnicas que estudaremos, são procedimentos metalúrgicos, técnicas essas que estão sendo adaptadas para reciclagem de REEE devido à recente necessidade apontada para encontrar alternativas mais adequadas para tratamento deste tipo de resíduo.

Neste trabalho estudaremos as seguintes técnicas: processos mecânicos, eletrometalúrgicos, pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos e biohidrometalúrgicos.

2 OBJETIVOS

Este trabalho visa descrever e discutir as diversas técnicas de recuperação de metais de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos. Apresentar as deficiências e as vantagens da utilização dessas técnicas, e identificar das técnicas apresentadas as mais eficientes para esse fim.

O estudo dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos têm por objetivo caracterizar esse tipo de resíduo quanto a sua composição química, verificando a presença ou não de substâncias perigosas à saúde ambiental e humana, e verificar a possibilidade de recuperação de tais elementos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Considerações iniciais sobre resíduos sólidos

3.1.1 Definição de Resíduos Sólidos

Um conjunto de normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004), define e classifica os resíduos sólidos através da NBR (Norma Brasileira Registrada) 10.004 (2004) da seguinte forma:

”resíduos nos estados sólidos e semi-sólidos, que resultam de atividade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos, instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgoto ou corpos de água, ou exijam, para isso, soluções técnicas e econômicas inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.”

Por sua vez a Lei nº 12.305 de agosto de 2010, regulamentada pelo Decreto 7404, de dezembro de 2010, institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), em seu 13º artigo, define os resíduos sólidos como:

“material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólidos ou semissólidos, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviável em face da melhor tecnologia disponível.”

3.1.2 Classificação dos Resíduos Sólidos

Os resíduos sólidos podem ser classificados de acordo com sua natureza física (seco ou molhado), composição química (orgânicos e inorgânicos), de acordo com a origem e fonte, quanto a seu grau de periculosidade em relação a determinados padrões de qualidade ambiental e de saúde pública. A classificação determina seu tratamento e/ou disposição final.

A ABNT disponibiliza por meio da NBR 10.004 uma classificação dos resíduos sólidos segundo os riscos potenciais ao meio ambiente e a saúde pública. São divididos em duas classes distintas:

Classe I – Perigosos

São os resíduos sólidos ou a mistura de resíduos que apresentam pelo menos uma das características como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, proporcionando risco à saúde pública, provocando ou contribuindo para o aumento da mortalidade ou incidência de doenças e/ou apresentar efeitos adversos no ambiente;

Classe II - Não perigosos

São os resíduos sólidos ou a mistura de resíduos que não apresentam riscos iminentes à saúde pública. Os resíduos dessa classe são subdivididos em duas categorias, sendo elas:

Classe II A – Resíduos não inertes

São os resíduos ou mistura de resíduos que não se enquadram na Classe I, ou Classe II B, apresentando uma das propriedades como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

Classe II B – Resíduos Inertes

São os resíduos ou mistura de resíduos, que não apresentam nenhum de seus constituintes solubilizados além dos padrões estabelecidos pela Norma ABNT – NBR 10.006: “Solubilização de Resíduos: Procedimentos” .

Outros critérios de classificação dos resíduos sólidos foram definidos e adotados por diversos autores, uma das mais difundidas e utilizadas é a de SCHALCH (1992). Este autor utilizou como critério em seu trabalho a separação segundo a sua origem e fonte. Subdividiu os resíduos em:

Resíduos Sólidos Urbanos (RSU): são os resíduos domiciliares, provindos das residências; o comercial, proveniente de estabelecimentos como escritórios, lojas e hotéis; os de varrição e serviço, como feiras livres, capinação e poda;

Resíduos Sólidos Industriais (RSI): são os resíduos resultantes de processos industriais. Nesta categoria, as características físicas e químicas do rejeito são muito diferentes, por isso para seu tratamento e disposição adequada são necessários estudos específicos para cada caso afim de encontrar a solução mais viável econômica e ambientalmente;

Resíduos de Serviços de Saúde (RSS): são todos aqueles resíduos gerados em qualquer serviço prestador de assistência médica, sanitária ou estabelecimentos congêneres, podendo, então, ser provenientes de farmácias, hospitais, unidades ambulatoriais de saúde, clínicas médicas e veterinárias, consultórios médicos e odontológicos, laboratórios de análises clínicas e patologias, instituições de ensino e pesquisa médica, bancos de sangue e outros;

Resíduos Radioativos (RR): são os resíduos provenientes do aproveitamento dos combustíveis nucleares;

Resíduos Agrícolas (RA): são aqueles que correspondem principalmente aos vasilhames descartados pelo uso de agrotóxicos.

Outro autor contribuiu com a classificação de SCHALCH (1992) incluindo duas novas definições. LEITE (1997) acrescentou em seu trabalho as seguintes definições:

Resíduos de Portos, Aeroportos, Terminais Rodoviários e Ferroviários: nesta classe foram contemplados os resíduos sépticos com presença de organismo patogênicos que podem veicular doenças de outras cidades, estados e países. Exemplo: materiais de higiene e asseio pessoal, restos de alimentos;

Resíduos de Construção e Demolição (RCD): esta classe contempla os resíduos provenientes de construções e demolição, restos de obra, solos de escavação, entre outros.

Dez anos depois, Lopes (2007) definiu mais dois grupos de resíduos sólidos específicos. São eles:

Resíduos Sólidos Domiciliares Perigosos (RDP): esta nova categoria inclui as baterias usadas, lâmpadas fluorescentes queimadas, restos de produtos de limpeza, embalagens de veneno, e outros gerados pós-consumo;

Resíduos Eletro-Eletrônicos (REE): são os resíduos provenientes de equipamentos eletroeletrônicos como componentes de computadores, impressoras, aparelhos de som e telefonia, entre outros.

A fim de simplificar e unificar a classificação, Schalch e Córdoba (2009) inspirados na política nacional de resíduos sólidos e nas definições da ABNT propuseram uma nova classificação a qual agrupa os diferentes resíduos sólidos em quatro categorias básicas. São elas:

Resíduos Sólidos Urbanos (RSU): neste grupo estão inseridos os resíduos sólidos domiciliares; resíduos de serviço de saúde; resíduos de portos, aeroportos, terminais rodoviários e ferroviários; resíduos de construção e demolição; resíduos de poda e capina; e resíduos de serviços (feiras livres, comerciais, de varrição, parques, etc);

Resíduos Sólidos Industriais (RSI): esta classificação permaneceu a mesma, ou seja, são os resíduos provindos das diversas atividades da produção industrial;

Resíduos Sólidos Rurais (RSR): são os resíduos oriundos das atividades agrícolas;

Resíduos Sólidos Especiais (RSE): neste grupo foram alocados os resíduos sólidos radioativos, os resíduos domiciliares perigosos, e os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos;

Essa nova classificação pode ser melhor visualizada no fluxograma apresentado na figura 1:

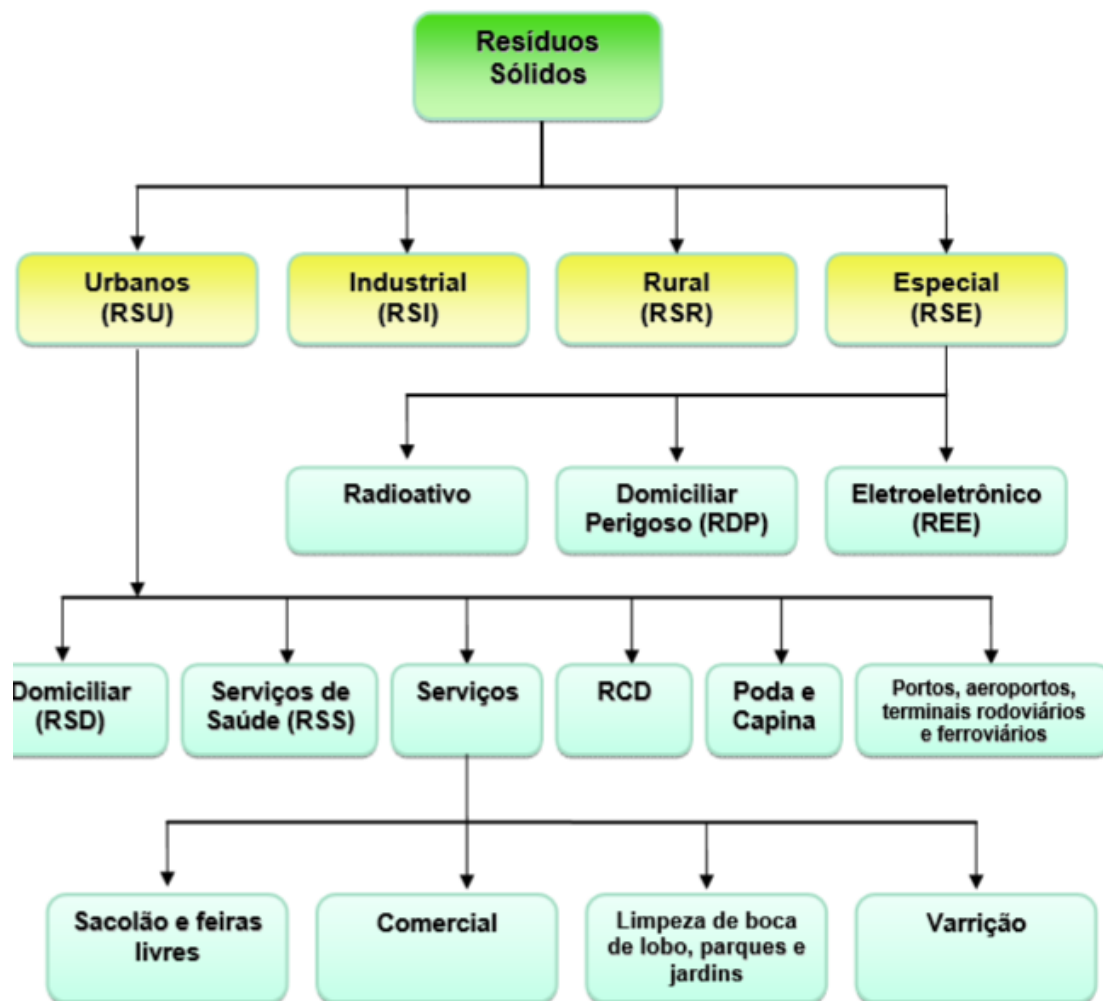


Figura 1 - Proposta de classificação dos resíduos sólidos segundo a origem.

Fonte: SCHALCH e CÓRDOBA (2009).

Em 2010, a Lei nº 12.305, define os principais termos relacionados aos resíduos sólidos, e classifica-os quanto à sua origem e periculosidade. Atualmente é essa classificação que é utilizada nos trabalhos, facilitando as conversas e discussões acadêmicas.

Classificação quanto à origem:

Resíduos sólidos domiciliares: originários de atividades domésticas em residências urbanas;

Resíduos sólidos de limpeza urbana: provenientes da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;

Resíduos sólidos urbanos: englobam os resíduos domiciliares, originários de atividades domésticas em residências urbanas, e os resíduos de limpeza urbana;

Resíduos sólidos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: todos os resíduos gerados por estas atividades, excetuando-se os produzidos em limpeza urbana, serviço de saneamento básico, serviços de saúde, construção civil e serviço de transporte;

Resíduos sólidos dos serviços públicos de saneamento básico: todos os resíduos provenientes desta atividade com exceção dos resíduos sólidos urbanos.

Resíduos sólidos industriais: gerados nos processos produtivos e instalações industriais;

Resíduos sólidos de serviços de saúde: gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do Sistema Nacional de Vigilância Sanitária (SNVS);

Resíduos sólidos da construção civil: originários em construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes de preparação e escavação de terrenos para obras civis

Resíduos sólidos agrossilvopastoris: gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, abrangidos os relacionados aos insumos utilizados nessas atividades;

Resíduos sólidos de serviços de transporte: gerados em portos, aeroportos, terminarias alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;

Resíduos sólidos de mineração: gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minério.

Organizando esta nova classificação em diagrama, fica com apresentado na figura 2:

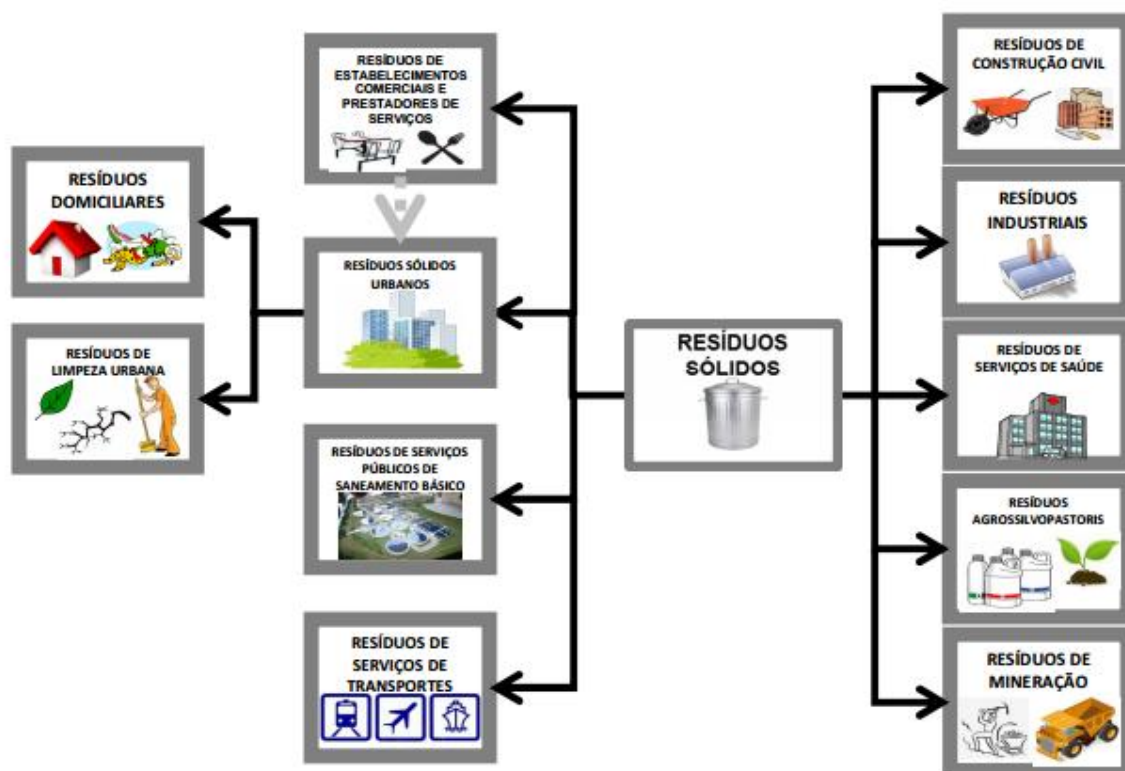


Figura 2 - Classificação dos Resíduos Sólidos segundo sua origem.

Fonte: FRACASSI (2012).

Classificação quanto à periculosidade:

Perigosos: todos que, em função de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública e/ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica cabível;

Não perigosos: todos aqueles não incluídos na classificação anterior.

3.1.3 Reciclagem

Segundo TEIXEIRA e ZANIN (2001), a reciclagem dos materiais pode ser definida como:

“o processo através do qual os constituintes de um determinado corpo ou objeto passam, num momento posterior, a ser constituintes de outro corpo ou objeto, semelhante ou não ao anterior. Neste sentido, trata-se de um fenômeno de larga ocorrência no ambiente

natural, e imprescindível para a manutenção da vida como se apresenta na Terra. Na maioria das vezes, tal processo é denominado apenas como “ciclagem” (ciclagem de nutrientes, ciclos biogeoquímicos), embora o prefixo “re” enfatize seu caráter recorrente.”

A reciclagem diminui a quantidade de resíduos lançados ao meio ambiente, contribuindo para a preservação dos recursos naturais, minimizando a utilização dos recursos não renováveis, sendo assim, é uma prática que vem ganhando relevância no gerenciamento dos RS. Mas para que isso ocorra, é necessário que a sociedade participe de forma mais ativa.

A reciclagem para a recuperação de um resíduo depende dos seguintes fatores: proximidade da instalação de reprocessamento, custos de transporte dos resíduos, volume de resíduos disponíveis para o processamento e custos de estocagem do resíduo no ponto de geração ou fora do ponto de origem (BIDONE, 1999; LOPES, 2003). Em seu trabalho BIDONE considerou apenas aspectos de logística, vale a pena ressaltar os gastos com o processo de reciclagem, assim como os custos com o tratamento e disposição dos resíduos gerados no processo de reciclagem.

Assim uma análise de custos e benefício se faz necessário para determinar se a reciclagem de um resíduo é considerada viável ou não. Considerando os pontos citados, um material poderá ser recuperado, caso seu valor de venda tenha condições de concorrer com o valor de mercado de um material não recuperado, ou ainda, se os gastos com sua recuperação forem menores que os gastos com o transporte, tratamento e disposição.

A recuperação de resíduos pode ser executada com poucos e simples processos, usando menos energia e gerando menos poluição do que a produção primária. As matérias primas secundárias, recuperadas de resíduos, muitas vezes são mais concentradas e mais puras do que a matéria prima primária, como o material já foi processado, se faz necessário somente um processo de purificação (VEIT, 2005).

3.2 Resíduos Sólidos e a questão ambiental

A Política Nacional de Meio Ambiente, Lei nº 6.938 de agosto de 1981, define poluição como qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que direta ou indiretamente afetam:

- I – a saúde, a segurança e o bem estar da população;
- II – as atividades sociais e econômicas;
- III – os animais e vegetais de uma região;
- IV – as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;
- V – a qualidade dos recursos ambientais.

Dentro deste contexto podemos definir os resíduos sólidos como matéria de produção de impacto ambiental quando não tratado de forma adequada.

Os resíduos sólidos passam a se tornar uma preocupação com a sociedade moderna. Com a revolução industrial do século XIX, tem o início a produção de bens de consumo em grande escala, que vinculado o elevado crescimento populacional (que aconteceu devido aos avanços na medicina), fez crescer a quantidade de lixo produzido, e começaram a surgir os problemas causados pelo acúmulo de RS. A mentalidade consumista da sociedade contemporânea vem agravando cada vez mais a problemática dos RS.

Os RS quando não recebem tratamento adequado, ou quando são dispostos de forma inadequada, podem trazer consequências graves para o ambiente e a saúde da população. Provocam a poluição do solo, da água superficial e subterrânea e do ar, através de processos naturais, como a biodigestão de resíduos (RODRIGUES, 2007).

Os REEE, por possuírem uma grande variedade de metais e outros compostos com propriedades tóxicas extremamente nocivas à natureza, vem se tornando uma preocupação cada vez maior com a busca de soluções para seu tratamento e descarte representando o menor impacto possível no meio ambiente.

De acordo com Souza (1993), houve uma grande explosão consumista após os anos 1950 que acabou criando a sociedade do descartável, tendo como principal estratégia por parte das organizações a obsolescência programada. As pessoas aprenderam a desperdiçar, a usar e descartar bens de todos os tipos. Tal atitude vem desencadeando problemas ambientais que poderiam ser amenizados através

do reaproveitamento e da reciclagem dos materiais (VIERIA, SOARES, SOARES; 2009).

O descarte prematuro dos EEE, ocasionado pela obsolescência planejada ou tecnológica, implica no início de um novo ciclo de consumo de materiais e energia, gerando novas emissões e resíduos em todas as outras etapas no ciclo de vida dos produtos (pré-produção, produção e distribuição) (RODRIGUES, 2007).

O quadro a seguir mostra as diversas etapas do ciclo de vida dos EEE. O quadro foi elaborado com base em MANZINE e VEZZOLI (2005).

EXTRAÇÃO DE RECURSOS (Pré-produção) Fase em que são extraídas as matérias primas e produzidos os materiais que serão utilizados nos componentes: aquisição dos recursos, transporte e transformação dos recursos em materiais ou energia.
PRODUÇÃO Tem três momentos fundamentais, a transformação dos materiais em componentes, a montagem e o acabamento.
DISTRIBUIÇÃO Três momentos principais caracterizam esta fase, a embalagem, o transporte e a armazenagem.
USO O produto é usado, requerendo energia para seu funcionamento, podendo produzir resíduos nesta fase (baterias esgotadas) ou então no caso de necessitarem de serviços de reparo e manutenção (componentes). O produto continua em uso até o momento que um usuário decida se descartar definitivamente dele. Isto pode ocorrer por motivos variados.
Pós-consumo : DESCARTE No momento do descarte abre-se uma série de opções sobre seu destino final: recuperação da função do produto ou de seus componentes (reutilização), valorização dos materiais ou de seu conteúdo energético (reciclagem e/ou tratamento) ou ainda pode-se optar por não recuperar nada do produto, encaminhando-o diretamente para a disposição final. Os produtos destinados tanto à reutilização quanto à reciclagem devem ser separados dos resíduos comuns, coletados e transportados.
REUTILIZAÇÃO As partes podem ser reutilizadas para a mesma função anterior ou para outra diferente. Em alguns casos pode ser refabricado (remanufaturado) , o que significa passar por processos que permitem que seja reutilizado como se fosse novo.
RECICLAGEM Esta fase é caracterizada por uma série de processos que vão desde a coleta especial até a pré-produção dos materiais reciclados
VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA Corresponde a recuperação do valor energético dos resíduos, através do processo de incineração.
DISPOSIÇÃO FINAL Componentes ou materiais que não são recuperados ou valorizados através das opções anteriores, são encaminhados a um local de destinação final (aterros de resíduos urbanos), sendo que os resíduos que possuírem características tóxicas devem receber tratamento.

Figura 3 - Quadro com as etapas do ciclo de vida dos EEE.

Fonte: RODRIGUES, 2007

3.3 Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE)

Nas ultimas décadas conseguimos observar um crescimento cada vez maior na produção e consumo de produtos eletroeletrônicos. Com os avanços tecnológicos acontecendo em ritmo cada vez mais acelerado, os aparelhos se tornam obsoletos e desatualizados em tempo cada vez menor, levando o consumidor a fazer o seu descarte sem que tenha se esgotado sua vida útil, nem que apresente defeitos irreparáveis em algum de seus mecanismos que justifiquem o descarte. Isso vem trazendo uma preocupação cada vez maior em relação ao tratamento e destinação deste tipo de resíduo, que representa uma parcela cada vez mais significativa do nosso lixo.

Segundo Yamane (2012) os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos podem ser definidos como “as várias formas de equipamentos, sendo gerado por fabrica de componentes e pelo descarte de equipamentos obsoletos ou em desuso, possuindo diferentes idades, origens e fabricantes, e consequentemente, composição variada”.

A Diretiva da União Europeia define os Equipamentos Elétricos e Eletrônicos como sendo “os equipamentos cujo adequado funcionamento de correntes elétricas ou campos eletromagnéticos, bem como os equipamentos para a geração, transferência e medição para essas correntes e campos pertencentes as categorias definidas no Anexo IA” (RODRIGUES, 2007)

Tabela 1 - Categorias de EEE de acordo com a Diretiva da União Européia.

Nº	Categorias
1	Grandes eletrodomésticos
2	Pequenos eletrodomésticos
3	Equipamentos de informática e de telecomunicações
4	Equipamentos de consumo
5	Equipamentos de iluminação
6	Ferramentas elétricas e eletrônicas (com exceção de ferramentas industriais fixas de grandes dimensões)
7	
8	Brinquedos e equipamentos de esportes e lazer
9	Aparelhos médicos (com exceção de todos os produtos implantados e infectados)
10	Instrumentos de monitoramento e controle
	Distribuidores automáticos

Fonte: RODRIGUES (2007)

Puckett e Smith (2001) adotaram em sua pesquisa o termo “e-lixo” para os REEE e os definem como sendo “desde grandes aparelhos domésticos como refrigeradores, ar condicionado, celulares, aparelhos de som, aparelhos de consumo e computadores que tenham sido descartado por seus usuários”. (RODRIGUES, 2007).

O acelerado desenvolvimento tecnológico de produtos eletrônicos é um incentivo para a troca de equipamentos que muitas vezes não se esgotaram, mas se tornam ultrapassados (MORAES, 2011). Conseguimos encontrar diversos exemplos em nosso dia a dia, como o caso dos aparelhos de som que até a década de 80 era comum encontrar na forma de disco de vinil, em meados dos anos 90 os aparelhos de CD se popularizavam substituindo as antigas vitrolas, e hoje utilizamos aparelhos para MP3/MP4.

A preocupação ambiental que permeia estes resíduos está relacionada a quantidade de metais existentes nestes equipamentos e a disposição final destes aparelhos. Atualmente os EEE, por geralmente serem descartados juntamente com os resíduos sólidos domiciliares, acabam em aterros sanitários onde os metais presentes no aparelhos sofrem um processo de lixiviação provocado pelos ácidos

orgânicos provenientes da degradação anaeróbia da matéria orgânica (MORAES, 2011).

Cerca de 70% dos metais pesados presentes nos aterros sanitários dos EUA são provenientes do resíduo eletroeletrônico (MORAES, 2011).

A competição global na indústria eletrônica está completamente voltada para a introdução de novos produtos no mercado. E o resultado dessa estratégia é a redução dos ciclos de vida dos produtos.

Outra tendência da indústria de EEE é tornar-se cada vez mais global e especializada. Rodrigues (2007) defende em sua tese que a indústria eletrônica, mais do que qualquer outro setor atravessa limites nacionais e setoriais, ainda diz que para competir neste setor deve estar presente em todos os principais mercados em crescimento, inclusive o mercado doméstico.

A globalização da competição é a principal impulsionadora das mudanças que vêm ocorrendo nas exigências competitivas da indústria eletrônica. Isso tem tido implicações importantes para o comportamento das empresas e para a estrutura do mercado, causando uma expansão rápida. A indústria eletrônica é a mais globalizada entre todas.

Tomando como exemplo a indústria de computadores: hoje é normal que a cadeia de suprimentos de computadores atravesse diversos continentes. Por exemplo, os produtos finais provavelmente, são dispersos nos mercados principais em crescimento como a Europa, EUA e Ásia. Enquanto os microprocessadores são produzidos nos EUA, os dispositivos de memória vem do Japão e da Coreia; placas mãe de Taiwan; disco-rígido de Cingapura; monitores da Coreia, de Taiwan e do Japão; e os teclados e interruptores e fontes de suprimento de Taiwan, etc.

Essa lógica de produção dificulta no estabelecimento de medidas de redução e controle de contaminação de todo o processo de fabricação dos EEE por ter sua produção dispersa e fragmentada. Também devemos considerar a legislação ambiental vigente em cada país que tem diferenças consideráveis em relação aos EEE, e em alguns são inexistentes.

As redes globais de produção de eletrônicos são lideradas pelas maiores corporações transnacionais, com suas matrizes sediadas nos países desenvolvidos, predominantemente nos EUA, Europa e Japão (SÁ, 2001; GOUVEIA, 2003; RODRIGUES, 2007).

Segundo Peplys (2002) a distribuição geográfica da cadeia de produção dos eletrônicos tem implicações nos impactos ambientais sobre o ciclo de vida dos produtos: os impactos que ocorrem na América do Norte, Europa e Japão são os originados principalmente pela fabricação dos chips e da grande massa de resíduos pós-consumo, enquanto os outros impactos relativos à produção são terceirizados junto com as atividades de manufatura. Rodrigues (2007) acrescenta que os impactos provocados pela massa de resíduos pós-consumo também são terceirizados, ou seja, o “resíduo eletrônico” gerado por países desenvolvidos tem sido constantemente exportado para países em desenvolvimento, em virtude das restrições legislativas ambientais e o aumento do custo de disposição final em seus países de origem.

3.3.1 Composição do Resíduo de Equipamentos Eletroeletrônico

Os EEE são compostos por vários módulos básicos. Os módulos básicos comuns a esses produtos geralmente são: conjuntos/placas de circuitos impressos, cabos, cordões e fios, plástico antichama, comutadores e disjuntores de mercúrio, equipamentos de visualização, como telas de tubos de raios catódicos (*Cathode Ray Tubes - CRT*) e de cristal líquido (*Liquid Crystal Displayer - LCD*), pilhas e baterias, meios de armazenamento de dados, dispositivos luminosos, condensadores, resistências, rês, sensores e conectores (CCE, 2000; RODRIGUES, 2007).

Quanto aos materiais utilizados para a fabricação dos EEE, sua composição varia muito entre os diferentes produtos. Os principais em termos de massa são: ferro, cobre, plástico, vidro e cerâmica. Além destes, ainda existem outros que são utilizados em quantidades relativamente pequenas, mas não necessariamente apresentam menor impacto ambiental.

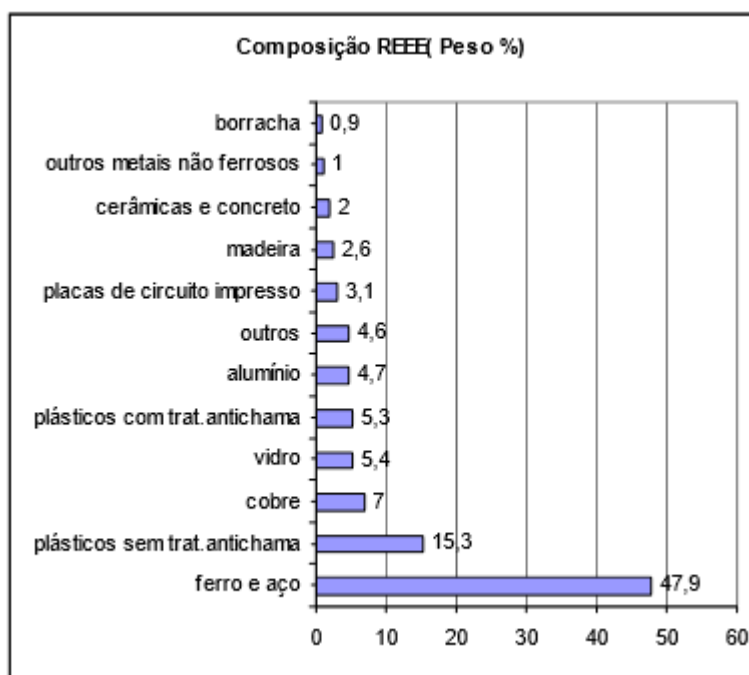


Figura 4 - Gráfico Composição de REEE segundo European Topic Center, 2006 (Peso - %).

Fonte: RODRIGUES (2007).

De acordo com WIDMER (2005) os REEE genericamente, podem conter mais de mil substâncias diferentes, muitas delas são altamente tóxicas como chumbo, mercúrio, arsênio, cádmio, cromo hexavalente e os retardantes de chamas bromados e halogenados, que geram dioxinas e furanos quando incinerados. São utilizados também muitos metais pesados e raros como ouro, prata, platina, bário, índio, selênio, zinco, bário e paládio. (RODRIGUES, 2007).

Os metais preciosos, em especial o ouro, tem ampla aplicação no processo de fabricação dos EEE, servindo como material de contato devido sua estabilidade química, propriedades condutoras e resistência à corrosão (CUI e ZHANG, 2008; YAMANE, 2012).

Esses metais são encontrados concentrados principalmente em: conectores elétricos, melhorando a condutividade e reduzindo o desgaste; placas de circuito impresso, protegendo contra oxidação; transistores, melhorando o seu desempenho; e capacitores, aumentando sua eficiência (MENETTI e CHAVES e TENÓRIO, 1996; YAMANE, 2012).

As substâncias mais problemáticas para a saúde humana e ambiental presentes nos REEE são os metais pesados, os gases de efeito estufa, como os CFCs (Clorofluorcarbonetos) presente em refrigeradores, as substâncias

halogenadas, bifenilas policloradas (PCB's), cloreto de polivinila (PVC), e os retardantes de chamas bromados (PBB e PBBE) e o arsênio (NORDIC COUNCIL OF MINISTERS, 1995^a; RODRIGUES, 2007).

A Tabela inspirada nos trabalhos de FORSSBERG (2003) e TSYDENOVA e BENGTSSON (2011) relacionam os componentes perigosos presentes no REEE.

Tabela 2 - Componentes perigosos no REEE.

Materiais e componentes	Descrição
Baterias	Metais como chumbo, mercúrio e cádmio podem estar presentes nas baterias
Telas de tubos catódicos	Chumbo no cone de vidro e camada fluorescente que cobre o interior do painel de vidro
Componentes contendo mercúrio, por exemplo, interruptores	Mercúrio é usado em termostatos, sensores, relês e interruptores. Também é usado em equipamentos médicos, transmissores de dados, telecomunicação e celulares.
Cartuchos de tinta, líquida ou pastosa, assim como cartuchos coloridos	Toners e cartuchos de tinta têm que ser removidos e coletados separadamente devido à tinta residual que pode conter metais como Pb
Placas de circuito impresso	Nas placas de circuito impresso, ocorre cádmio em certos componentes, por exemplo, chips, detectores e semicondutores e Pb nas soldas
Capacitores contendo bifenilas policloradas	Capacitores têm que ser removidos, pois caso venham a ser incinerados geram gases tóxicos
Plásticos contendo retardadores de chama halogenados	Durante a incineração/combustão do plástico com retardadores de chama halogenados pode ocorrer a geração de gases tóxicos
Equipamentos contendo CRC, HCFC ou HFCs	CFC ou HCFC presentes na espuma e no circuito de refrigeração devem ser apropriadamente extraídos e destruídos e o mercúrio deve ser removido

Fonte: YAMANI (2012).

A composição de um computador pessoal (PC) tem grande diversidade de materiais e presença de substâncias perigosas. A tabela a seguir traz a relação dos materiais utilizados para a produção de um PC.

Tabela 3 - Composição de um PC - Computador pessoal.

Material	Conteúdo (% peso) total	Uso
Plásticos	22,9907	Cabos e gabinetes
Chumbo	6,2988	Tubo de raios catódicos e placas de circuito impresso
Alumínio	14,1723	Gabinetes, conectores, Placas de circuito impresso, CRT
Germânio	0,0016	Placas de circuito impresso
Gálio	0,0013	Placas de circuito impresso
Ferro	20,4712	Gabinetes, Cinescópio, placas de circuito impresso
Estanho	1,0078	Cinescópio e Placas de circuito impresso
Cobre	6,9287	Cinescópio, Placas de circuito impresso, conectores e cabos
Bário	0,0315	Tela painel de vidro dos cinescópios
Níquel	0,8503	Gabinetes, Cinescópio , placas de circuito impresso
Zinco	2,2046	Cinescópio e Placas de circuito impresso
Tálio	0,0157	Capacitores, placas de circuito impresso
Índio	0,0016	Placas de circuito impresso
Vanádio	0,0002	Cinescópio
Terbio	0	Cinescópio e Placas de circuito impresso
Berílio	0,0157	Placas de circuito impresso e conectores
Ouro	0,0016	Placas de circuito impresso, conectores
Európio	0,0002	Placas de circuito impresso
Titânio	0,0157	Gabinetes
Rutênio	0,0016	Placas de circuito impresso
Cobalto	0,0157	Gabinetes, Cinescópio, placas de circuito impresso
Paládio	0,0003	Placas de circuito impresso e conectores
Manganês	0,0315	Gabinetes, Cinescópio, placas de circuito impresso
Prata	0,0189	Placas de circuito impresso e conectores
Antimônio	0,0094	Gabinetes, Cinescópio, placas de circuito impresso
Bismuto	0,0063	Placas de circuito impresso
Cromo	0,0063	Gabinetes
Cádmio	0,0094	Baterias, gabinetes, CRT, placas de circuito impresso
Selênio	0,0016	placa de circuitos impressos
Platina	0	Placas de circuito impresso
Mercúrio	0,0022	Baterias, interruptores, gabinetes e placas de circuito impresso
Arsênio	0,0013	Placa de circuito impresso
Sílica	24,88	Tubo de Raios Catódicos, placa de circuito impresso

Fonte: Eletronic Waste Guide, SECO (2006).

De acordo com a literatura revisada, os REEE contêm substâncias que conferem perigos físicos-químico e efeitos toxicológicos, em vários níveis e formas. A Tabela 4 relaciona alguns dos elementos mais relevantes do ponto de vista

toxicológico com sua utilização mais frequente, algumas formas de exposição e possíveis danos à saúde humana.

Tabela 4 - Substâncias tóxicas relevantes utilizadas nos EEE/Efeitos na saúde.

SUBSTÂNCIA	USO E EXPOSIÇÃO	EFEITOS NA SAÚDE
ARSÊNIO	Usado pela indústria de eletrônicos na fabricação de semicondutores de gálio-arseniato nas áreas de telecomunicações, pilhas solares e pesquisas especiais. A exposição a níveis mais altos ocorre sobre tudo nos postos de trabalho e próximos aos aterros de resíduos perigosos.	Em níveis mais elevados o arsênio inorgânico pode causar a morte. A exposição a níveis mais baixos por muito tempo pode causar a descoloração da pele e a aparência de grãos ou de verrugas pequenas.
BERÍLIO	As ligas de berílio são usadas para fazer componentes elétricos e eletrônicos ou como materiais de construção de maquinaria e moldes para plásticos. Podem ser encontrados em quantias pouco significativas em produtos de consumo tais como televisão, calculadoras e computadores pessoais, o contato direto com o metal existente nesses produtos é pouco provável desde que esses materiais estejam devidamente protegidos em um compartimento que impeça a exposição direta. A exposição ocupacional ao berílio ocorre em locais onde o material é extraído, processado ou convertido em metal, ligas e outros produtos químicos. Os trabalhadores envolvidos na reciclagem do berílio das ligas, das sucatas ou do uso de produtos do berílio podem estar expostos a níveis mais elevados do óxido do berílio.	Dano no pulmão de pessoas expostas a níveis elevados de berílio no ar. Cerca de 1 a 15% de todas as pessoas ocupacionalmente expostas ao berílio no ar tornam-se sensíveis podendo desenvolver a doença crônica do berílio. Estudos sobre trabalhadores relatam um aumento de risco do câncer de pulmão. A EPA determinou que o berílio fosse um provável agente carcinogêneo humano
CÁDMIO	A exposição acontece na maior parte das vezes nos locais de trabalho onde os produtos que contém cádmio são fabricados. Os trabalhadores podem estar expostos aos cádmio no ar da fundição e do refino dos metais, ou no ar das fábricas que fazem produtos como baterias, revestimentos ou plásticos. A exposição pode também acontecer ao soldar o metal que contém cádmio.	Danifica os pulmões, podendo afetar os rins e causar irritação no aparelho digestivo. A agência internacional para pesquisa do câncer determinou o cádmio como carcinogênico para seres humanos.
CHUMBO	A disposição final de produtos contendo chumbo nos resíduos domiciliares contribui para presença nos aterros municipais. A exposição ao chumbo pode acontecer pela respiração da poeira nos locais de trabalho, como nas instalações de reciclagem onde equipamentos eletrônicos são quebrados ou triturados ou pela ingestão de alimentos ou água contaminados.	O chumbo acumula-se no ambiente, produzindo elevados efeitos tóxicos agudos e crônicos em plantas, animais e microrganismos. Em seres humanos pode causar danos no sistema nervoso central e periférico e no sistema endócrino.

SUBSTÂNCIA	USO E EXPOSIÇÃO	EFEITOS NA SAÚDE
MERCÚRIO	<p>O mercúrio metálico é usado em uma variedade de produtos de uso doméstico e artigos industriais, incluindo os termostatos, lâmpadas fluorescentes, barômetros, termômetros e dispositivos de medição de pressão arterial.</p> <p>Aproximadamente 15% do total são liberados ao solo por fertilizantes, fungicidas e resíduos urbanos municipais. A exposição ocorre por inalação do ar, ingestão hídrica ou de alimento contaminado. As ocupações que tem maior potencial para exposição do mercúrio são nas fabricas de equipamentos elétricos e eletrônicos ou de peças automotivas que contem mercúrio e algumas indústrias químicas.</p>	Exposição a níveis elevados de mercúrio metálico, inorgânico ou orgânico pode danificar cérebro, rins e feto em formação. O metil mercúrio e os vapores metálicos são mais prejudiciais do que outras formas. Os efeitos no cérebro podem resultar em irritabilidade, timidez, tremores, alterações na visão ou audição, problemas na memória.
TÁLIO	Fabricação de dispositivos eletrônicos, interruptores. A exposição a níveis mais elevados pode ocorrer em locais de trabalho.	Níveis elevados no ar podem resultar em efeitos no sistema nervoso. Sua ingestão resulta em vômitos, diarreia e perda provisória de cabelos.
PBB (polychlorinated biphenyls)	São adicionados aos plásticos usados em produtos como monitores, televisões, plásticos espuma, cabos e condutores, etc. para torna-los resistentes à chama.	PBB já não é mais produzido, mas ainda pode ser encontrado no ambiente.
PBDEs (polychlorinated diphenyl ethers)	Grupo de composto sintético químico orgânico, retardantes de chama que são adicionados a uma variedade de produtos para torna-los resistentes à chama. Seu principal uso é um gabinetes de eletrônicos. Há concentrações baixas de PBDEs no ar e na poeira suspensa em ambientes com eletrônicos e altas concentrações em ambientes onde são produzidos os equipamentos eletrônicos ou em postos de trabalho onde espumas com PBDEs são armazenadas.	Muito pouco se conhece sobre seus efeitos na saúde humana, os principais relatos foram em ratos, com efeito na glândula da tireóide quando ingeridos PBDEs. Os estudos sugerem que concentrações elevadas podem causar alterações neurocomportamentais e afetar o sistema imunológico.
PCB (polychlorinated biphenyls); mistura de cerca de 209 compostos clorados.	<p>Usados como fluídos e lubrificantes em transformadores, capacitores e outros equipamentos eletrônicos como isolantes. Sua produção foi interrompida em 1977 nos EUA.</p> <p>PCBs podem ainda serem liberados nos seguintes ambiente: locais de resíduos perigosos e eliminação ilegal ou imprópria de resíduos industriais e de produtos de consumo e também incêndios acidentais; pelo uso de dispositivos elétricos feitos há mais de 30 anos, tais como televisão e refrigeradores; nos postos de trabalho durante o reparo e manutenção de transformadores.</p>	Os efeitos de saúde associados com a exposição à PCB incluem problemas de pele e mudanças neurocomportamentais e imunológicas em crianças. PCB são conhecidos por causar câncer em animais.

Fonte: Rodrigues (2007)

O quadro foi elaborado a partir do Banco de informações toxicológicas da *ATSDR – Agence for Toxicity Substances and Disease Registry*.

A maioria dos EEE possui placa de circuito impresso em seu interior que podem chegar a representar até 30% da massa total do produto e a presença de metais é essencial para o funcionamento desta tecnologia. Por esta razão, cada vez mais estudos visando à recuperação de metais de placas de circuito impresso estão sendo realizados (MORAES, 2011).

3.3.2 Geração de Resíduo de Equipamentos Eletroeletrônico

Os dados disponíveis sobre a geração de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos ainda são escassos e as estimativas são feitas baseadas em balanços de venda, importação e exportação (ROBINBON, 2009; YAMANI, 2012).

O Brasil foi apontado como o país que gera a maior quantidade de resíduo de computadores pessoais, no grupo de países classificados como tendo o maior potencial para adaptar tecnologias pré e pós-processamento do REEE, no relatório divulgado pela *United Nations Environment Programme* (UNEP) em 2009. O relatório tratava sobre as barreiras para transferência de tecnologias de reciclagem de REEE.

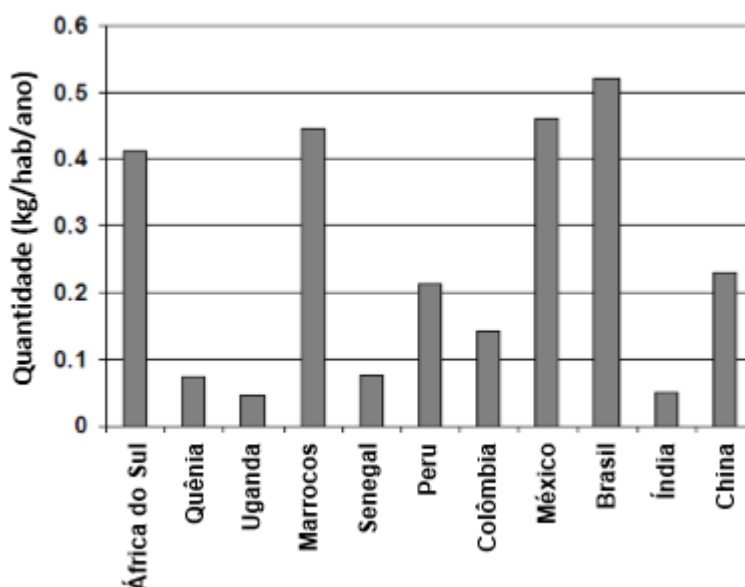


Figura 5 - Gráfico da quantidade de REEE gerado a partir de computadores pessoais (kg/hab.ano) em diversos países.

Fonte: YAMANI (2012).

Segundo Ribeiro (2011), a estimativa de REEE gerados no Brasil no ano de 2011 foi de aproximadamente 670 mil toneladas por ano, e estimou que o acúmulo entre 2001 e 2030 será de 22,4 milhões de toneladas.

Na literatura encontramos que a geração de REEE no mundo está cada ano maior. As situações mais alarmantes são nos países considerados de primeiro mundo.

A geração de REEE está crescendo cerca de 4% ao ano, e estima-se que 315 milhões de computadores foram descartados nos EUA entre os anos de 1997 à 2004. Um estudo feito pela Universidade das Nações Unidas (UNU), indicou que a União Européia é responsável pela geração de quase $\frac{1}{4}$ dos REEE no mundo (cerca de 8-9 milhões de toneladas por ano), sendo a produção global estimada em 40 milhões (YAMANI, 2012).

Em 1994 estimou-se que aproximadamente sete milhões de toneladas de computadores se tornaram obsoletos em todo o mundo, enquanto em 2004 foi uma quantidade equivalente a 35 milhões de toneladas.

Este aumento pode estar associado ao tempo de decaimento da vida útil de um computador. Em 1994 a durabilidade de um computador era em torno de 5 anos, já em 2004 essa estimativa caiu para cerca de 2,5 anos (MORAES, 2011).

A vida útil de um aparelho celular também caiu consideravelmente, hoje a estimativa é de um ano, e estima-se que cerca de 100 milhões de aparelhos celular são descartados anualmente no mundo pelos mesmos motivos que os computadores (PARSON, 2006; MORAES, 2011).

Esses dados apresentados acima refletem o panorama mundial em relação a geração de REEE, e apesar de imprecisos revelam que o descarte desses materiais cresce a cada ano. Tudo isso justifica a crescente importância que o gerenciamento dos REEE vem ganhando, principalmente no que diz respeito a busca de novas tecnologias e aperfeiçoamento de processos de reciclagem desses materiais.

3.4 Legislação sobre Resíduo de Equipamentos Eletroeletrônico

Nas ultimas duas décadas têm ocorrido um aumento do número de políticas ambientais e leis focando o processo de desenvolvimento de produtos e gestão dos

mesmos com vista à redução dos impactos ambientais resultantes desse produto (YAMANE, 2012).

No Brasil ainda não existe uma legislação específica em âmbito nacional sobre REEE, mas em agosto de 2010 foi sancionada a Lei 12.305 – Política Nacional de Resíduos Sólidos que estabelece diretrizes para a gestão integrada e gerenciamento de resíduos sólidos nos municípios, bem como normas para redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos RS. Traz o princípio da responsabilidade estendida do produtor e prevê ainda tratamento especial (mediante posterior regulação) dos REEE. A lei ainda estabelece a responsabilidade por parte dos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de EEE a estruturar e implementar sistemas de logística reversa, mediante retorno dos produtos após o uso pelo consumidor.

No entanto alguns estados possuem leis específicas para a regulamentação dos REEE.

No estado de São Paulo existe a lei 13.576 que institui normas e procedimentos para a reciclagem, gerenciamento e destinação final do lixo tecnológico. Também foi publicada a Resolução SMA-038 de 2/8/2011, que estabelece a relação de produtos geradores de resíduos de significativo impacto ambiental, dentre eles os EEE, cujos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes deverão implementar programa de responsabilidades pós-consumo para fins de recolhimento, tratamento e disposição final de forma adequada.

No Paraná, a Lei Estadual 15.851/2008, estabelece a obrigatoriedade das empresas produtoras e distribuidoras, que comercializam equipamentos de informática a criarem e manterem um programa de recolhimento, reciclagem e destruição desses equipamentos sem causar poluição ambiental.

A Lei Estadual 8.876/2008 do estado do Mato Grosso que dispõe sobre a coleta, reciclagem, tratamento e disposição final do lixo tecnológico, define quais são os REEE, e que devem ser entregues aos estabelecimentos que os comercializam, e estes ficaram a cargo de implantar sistemas de reutilização, reciclagem, tratamento e destinação final. Ainda estabelece que os equipamentos sejam reaproveitados para fins sociais.

No estado de Santa Catarina, a Lei 14.364/2008, que estabeleceria o gerenciamento do REEE, determina em artigo único a responsabilização pós-

consumo do fabricante, importador e empresas que comercializem produtos e respectivas embalagens ofertadas ao consumidor final, em que couber.

No Decreto 23.941/2002, o governo de Pernambuco regulamenta a Lei 12.008/2001 e estabelece que os comerciantes de EEEs são obrigados a dar tratamento e destinação final e ainda, que a destruição térmica deve proceder utilizando os mesmos processos utilizados no tratamento de resíduos perigosos.

No âmbito internacional temos três exemplos de iniciativas para tentar resolver o problema dos REEE que transpõe barreiras internacionais. Foram a Convenção da Basileia em 1989 que definiu diretrizes para o controle do movimento de resíduos perigosos e sua disposição, a Conferência de Estocolmo sobre poluentes orgânicos, e a Conferência de Roterdã sobre o comércio internacional de produtos químicos perigosos.

Na União Européia existem duas diretivas específicas para EEE. A “*Waste Electrical and Eletronic Equipment (WEEE)*” (2002/96/EC) estabelece regras para a gestão dos REEE, tendo como principais considerações a recuperação, reciclagem e reuso do REEE, e tem como princípio a responsabilização do poluidor. A “*Restriction of the Use o Certain Hazardous Substances in Electrical and Eletronic Equipment (RoHS)*”, restringe o uso de seis substâncias perigosas: chumbo, mercúrio, cádmio, cromo hexavalente, bifenil polibrominato e difenil-éter polibrominado, que são comumente encontrados em EEEs (YAMANI,2012).

A Alemanha criou uma lei para complementar as citadas anteriormente, a Lei ElektroG, que estabelece o gerenciamento do REEE no país. A lei reúne os conteúdos da WEEE e da RoHS e determina a circulação, a devolução e a eliminação sustentável dos EEE antigos (YAMANI,2012).

No Japão em abril de 2001 foi sancionada a *Home Appliances Recycling Law*, que obriga os fabricantes a receber e reciclar os aparelhos usados. O país iniciou a lei com reciclagem compulsória de computadores de empresas, expandindo em 2003 para os computadores domésticos (KAHHAT e KIM e XU e ALLENBY e WILLIANS e ZHANG, 2008; YAMANI, 2012).

Na China os coletores pagam ao consumidor por seus equipamentos usados, mesmo sem funcionar, e depois do desmantelamento, o REEE é mandado para refinarias de metais no sudeste do país (YAMANI,2012).

Na Coreia do Sul, foi sancionada a lei da responsabilidade estendida do produtor, que determina que fabricantes, distribuidores e importadores de EEE como

ar condicionado, televisores e computadores devem atingir metas oficiais de reciclagem passíveis de multa (ANDRADE, 2002).

3.5 Tipos de Tratamento do Resíduo de Equipamentos Eletroeletrônico

As opções no tratamento do resíduo de equipamentos eletroeletrônicos comumente envolvem o reuso, remanufatura ou remodelamento, reciclagem, além das formas usuais de tratamento e disposição final dos resíduos sólidos (como a incineração e aterros). Geralmente os REEE são dispostos junto aos resíduos urbanos, com exceção de eletrodomésticos como geladeiras e fogões que usualmente seus materiais são reutilizados pela indústria de produção secundária de metais, tendo como destino final a queima ou aterros (YAMANI, 2012).

A melhor forma de tratamento é o reuso, ou seja, o não descarte de equipamentos que não apresentam defeitos irreparáveis, assim a vida útil do aparelho é estendida reduzindo o volume que necessita ser tratado. O aparelho que já não apresenta utilidade para o comprador original para ter valor para outros, o reuso dos REEE deve ser prioridade no gerenciamento dos mesmos.

A remanufatura envolve a desmontagem, limpeza, reparo ou modelamento, remontagem e teste para a produção de equipamentos novos ou semi-novos, e envolve o uso de peças antigas e reposição com peças novas (YAMANI, 2012).

O grande problema do reuso e da remanufatura é que muitas vezes se torna inviável economicamente. O custo para esses processos costuma ser superior ou quase igual ao da compra de um aparelho novo.

A reciclagem, diferente da remanufatura, faz o reprocessamento do resíduo para a produção de materiais com propósito original ou outros propósitos. É muito utilizada para a recuperação de metais preciosos e de significativo valor de mercado.

Como vimos nos itens anteriores, a disposição dos REEE junto com os resíduos urbanos apresentam grande periculosidade para a saúde ambiental e humana, causando contaminação no solo, ar e água devido a alta concentração de metais. Portanto a disposição em solo e técnicas como incineração (se não houver controle e tratamento das emissões gasosas) não são práticas recomendadas.

A reciclagem de REEE acontece basicamente em três etapas:

- Desmontagem: Separação seletiva dos componentes do EEE;
- Beneficiamento: utilização de processos mecânicos/físicos e ou processos metalúrgicos para concentrar os materiais;
- Refino: este é o estágio em que os materiais são recuperados.

A desmontagem visa a caracterização dos materiais que compõe o EEE com o objetivo de otimizar os processos de beneficiamento, e identificar qual o melhor tipo de processo pode ser aplicado naquele material.

Neste trabalho estudaremos os processos de beneficiamento e refinamento da PCI, pois a desmontagem geralmente ocorre de forma manual, sem necessitar de equipamentos específicos nem mão de obra muito especializada.

Veremos, nos próximos tópicos da revisão bibliográfica, os processos mecânicos, eletrometalúrgicos, pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos e biohidrometalúrgicos.

3.5.1 Processamento mecânico

O processamento mecânico visa a separação física dos componentes. Esses processos têm sido utilizado como parte de etapas de tratamento e beneficiamento de minérios na metalúrgica primária. Geralmente é aplicado como pré-tratamento visando concentrar os metais para posterior recuperação.

Fazem parte do processamento mecânico técnicas como: redução de tamanho (cominuição), separação granulométrica, separação gravimétrica, separação eletrostática, separação magnética, etc. Abaixo estão descritas algumas delas:

Cominuição: também conhecida como redução de tamanho ou moagem, nada mais é do que uma força bruta fragmentando o REEE pelo movimento de “martelos”, “bolhas” ou “facas”, dentro de um compartimento fechado. O mecanismo utilizado pode ser a pressão, impacto, abrasão ou corte. Os equipamentos que são geralmente utilizados são: moinho de martelos, moinho de cortes e fragilização criogênica (congelamento a temperaturas muito baixas com nitrogênio líquido, aumentando a eficiência do moinho).

Classificação granulométrica: geralmente o material após passar pelo processo de cominuição deve passar por uma classificação. Isso é feito através de peneiras que são superficialmente furadas ou vazadas sobre a qual se dá o movimento da partícula. As partículas menores tendem a passar pelas perfurações, enquanto as maiores são retidas.

Separação gravimétrica: essa técnica é baseada na diferença de densidade que existe entre os diversos tipos de materiais, para isso utiliza-se líquidos densos (líquidos densos, utilizado para separação de polímeros e cerâmicas, por exemplo) e líquidos suspensos (líquidos de densidade intermediária, utilizado no tratamento de carvão para remover elevadas frações de cinzas, por exemplo).

Separação magnética: baseia-se no movimento diferencial de materiais em campo magnético, podendo ser dividido em duas grandes categorias: *materiais diamagnéticos*, são os repelidos pelo campo magnético movendo-se para a posição mais baixa intensidade de campo; e *materiais paramagnéticos*, são atraídos pelo campo magnéticos movendo-se para a posição de maior intensidade de campo.

Separação eletrostática: utiliza forças que atuam nas partículas carregadas ou polarizadas em um campo elétrico. Uma vez que cada material tem suas próprias características elétricas isso resulta em movimentos diferentes das partículas no campo e sua subsequente seleção dentro de diferentes processos a base de um fluxo.

Após a obtenção de frações concentradas em metais através de processamentos mecânicos é necessário algum outro processo a fim de obter os metais separadamente.

3.5.2 Pirometallurgia

Os processos pirometalúrgicos consistem na separação térmica dos materiais. Para esse tratamento estão inclusos: incineração, fusão, pirólise, escorificação, sintetização, reação da fase gasosa em alta temperatura, entre outros. Foi o método tradicional para recuperar metais não-ferrosos e metais preciosos de REEE, no final do século passado (VEIT, 2005).

O processamento pirometalúrgico para recuperação de metais a partir de REEE, de forma geral, se procede com a redução direta dos óxidos metálicos a temperaturas (acima de 1000°C) usando o carbono como agente redutor, e oxidação térmica das impurezas voláteis juntamente com os compostos orgânicos, formando como subprodutos: a escória (contendo óxidos de ferro e alumínio), o material particulado retido no filtro (rico em óxido de zinco, chumbo e estanho) e os gases (impurezas voláteis) que deveram receber tratamento posterior, pois são tóxicos (MORAES, 2011).

Adicionalmente para facilitar o processo de fundição é feita a insuflação de ar que atua como agente oxidante, e o cobre obtido ao final do processo arrasta quase todos os metais preciosos presentes na sucata (SANTOS, 2010; MORAES, 2011).

Os retardantes de chamas presentes nos REEE, tem em sua constituição a presença de compostos bromados, o que dificulta o tratamento térmico do resíduo, pois são precursores de dibenzo-p-dioxinas e dibenzofuranos. Estudos de destruição térmica de REEE com monitoramento de furanos e dioxinas halogenadas mostram que a incineração é uma opção viável se for usado equipamento para o controle das emissões (MORAES, 2011; TSYDENOVA e BENGTTSSON, 2011 YAMANE, 2012).

Os processos pirometalúrgicos podem estar combinados com aplicação posterior de técnicas hidrometalúrgicas.

O processo pirometalúrgico tem algumas vantagens como: aceitar qualquer tipo de sucata eletrônica, não requerer um pré-tratamento e requerer poucas etapas. (VEIT, 2005).

Alguns métodos envolvendo processamento térmico de sucata eletrônica podem causar os seguintes problemas: poluição do ar através da queima de polímeros e outros materiais isolantes que formam dioxinas e furanos; os metais podem ser perdidos através da volatilização de seus cloretos; perda de metais nobres e metais bases devido a presença de cerâmica e vidro no REEE o que

aumenta a escória produzida no processo; a recuperação de outros metais é baixa (ex. Sn e Pb) ou praticamente impossível (ex. Al e Zn) (VEIT, 2005).

3.5.3 Hidrometalurgia

Os processos hidrometalúrgicos podem ser definidos como processos de interface de uma fase sólida com uma líquida, com temperaturas podendo variar de 10 a 300°C (YAMANI, 2012).

Os passos no processamento hidrometalúrgico consistem em uma série de ataques de solução ácidas ou cáusticas para dissolver o material sólido. As soluções então submetidas a procedimento de separação como extração por solventes, precipitação, cementação, troca iônica, filtração e destilação para isolar e concentrar os metais de interesse (VEIT, 2005).

Uma série de processos hidrometalúrgicos, incluindo lixiviação, separação, e recuperação tem sido empregada para a recuperação de metais valiosos de concentrados metálicos.

Os agentes lixiviantes mais comuns usados na recuperação de metais preciosos incluem cianetos, haletos, tiouréia e tiosulfato (KOLODZIEJ e ADAMSKI, 1984, QUINET et al. 2005, SHENG e ETSELL, 2007).

O processo apresenta algumas vantagens na recuperação de metais sobre a pirometalurgia, são elas: redução do impacto ambiental (visto que não há geração de gases tóxicos); separação mais fácil dos principais componentes do REEE; menor custo.

As técnicas hidrometalúrgicas também apresentam desvantagens. Sendo elas: dificuldade em aceitar REEE mais complexos; necessidade de redução de volume previamente; o ataque químico só é efetivo se o metal estiver exposto; demanda grandes volumes de soluções; produz efluente contendo elementos corrosivos e/ou tóxicos; geração de resíduos sólidos.

3.5.4 Processo biohidrometalúrgico

O processo biohidrometalúrgico, também conhecido como biolixiviação, caracteriza-se pela solubilização de metais através da ação de microrganismos. Esta técnica geralmente é utilizada para recuperação de metais de interesse econômico (YAMANI, 2012).

A biolixiviação ocorre em condições aeróbias, e os principais microrganismos capazes de oxidar ferro (II), enxofre e sulfetos minerais são dos gêneros *Acidithiobacillus*, *Leptospirillum*, *Sulfobacillus*, *Sulfolobus* e *Acidianus* e estão presentes na drenagem ácida de minas (YAMANE, 2012).

Dois mecanismos são propostos para a oxidação biológica de íons ferrosos e compostos reduzidos de enxofre, sendo eles: o *mecanismo direto* é mediado pela ação bacteriana e pelas reações químicas catalisadas enzimaticamente supondo o contato físico dos microrganismos com a superfície mineral; e o *mecanismo indireto*, como sendo as reações químicas, não havendo contato físico entre o microrganismo e o mineral.

A contribuição de cada mecanismo na biolixiviação depende das características do substrato e das condições em que ocorre o processo, sendo que a interação entre a célula e a superfície mineral é dependente de vários parâmetros físicos e bioquímicos (que estão apresentados na Tabela 5 que será apresentada a seguir), porém a adaptação é uma parte crucial da conduta metabólica, na qual a bactéria não somente é capaz de reconhecer uma nova fonte de substrato, mas também responde às mudanças da concentração do meio (YAMANE, 2012).

Tabela 5 - Fatores e parâmetros que podem influenciar a lixiviação microbiana.

Fator	Parâmetro
Parâmetros físico-químicos	pH
	temperatura
	potencial oxi-redução
	disponibilidade de oxigênio
	disponibilidade de dióxido de carbono
	transferência de massa
	disponibilidade de nutrientes
	concentração de íon férrico
Parâmetros microbiológicos	tensão superficial
	presença de inibidores
	diversidade microbiológica
	densidade populacional
	atividade microbiana
	distribuição espacial dos microorganismos
	tolerâncias aos metais
	habilidade de adaptação dos microorganismos
Propriedades do minério/resíduo a ser lixiviado	tipo de minério/resíduo
	composição do minério/resíduo
	tamanho das partículas
	área de superfície
	porosidade
	hidrofobicidade
Tipo de processo	interações galvânicas
	tipo de lixiviação (<i>in situ</i> , pilha, ou tanque de lixiviação)
	densidade de polpa
	agitação
	geometria da pilha

Fonte: YAMANE 2012.

As principais vantagens do processo são: o processo é mais barato; o requerimento de energia é menor se comparado com os pirometalúrgicos; necessita de menor mão-de-obra especializada; além de evitar a emissão de poluentes na atmosfera; simplicidade nas instalações. As principais limitações são os longos períodos de “ataques” e a necessidade dos metais estarem expostos.

3.5.5 Eletrometalurgia

As técnicas de eletrometalurgia, também conhecidas como eletroquímica, para remoção de metais de REEE são passos de refinamento para a recuperação

do metal puro. Processos eletroquímicos são usualmente efetuados em eletrólitos aquosos ou sais fundidos.

Os processos eletrometalúrgicos apresentam vantagens na recuperação de metais preciosos tais como poucas etapas, o concentrado desses metais a partir da eletrólise representa 95 – 97% do metal encontrado na sucata (a quantidade de metais preciosos no lodo anódico depois de fundição e de eletrólise como refinação é muito baixo), são aplicáveis em todos os tipos de sucatas contendo uma camada superficial de metais preciosos sobre um substrato de metal base, todos os metais preciosos podem ser dissolvidos simultaneamente ou seletivamente (se necessário), o substrato a base de cobre permanece inalterado e o eletrólito pode ser reciclado, sua grande limitação é o tipo de sucata eletrônica que pode ser usada como alimentação, ou seja, a sucata tem de ser pré-classificada (HOFFMANN, 1992).

Duas técnicas em específico são muito utilizadas para remoção de metais, a eletro-obtenção e o eletro-refino. A eletro-obtenção é utilizada quando se tem um eletrólito contendo o íon metálico de interesse. O eletro-refino é utilizado quando se tem um anodo “impuro”, ou seja, contém o íon metálico de interesse além de outros componentes (VEIT, 2005).

As principais vantagens do processo são: é realizado em poucas etapas; o concentrado de metais a partir da eletrólise representa 95 – 97% do metal encontrado no REEE, e a quantidade de metais preciosos no lodo depois de fundição e eletrólise como refinação é muito baixo; é aplicável em todos os tipos de REEE contendo uma camada superficial de metais preciosos sob um substrato de metal base; todos os metais preciosos podem ser dissolvidos simultaneamente ou seletivamente; o eletrólito pode ser reciclado (VEIT, 2005).

4 METODOLOGIA

A metodologia aplicada para o estudo foi a revisão de trabalhos que aplicaram as técnicas descritas no item 3.5 do presente trabalho, para recuperação dos resíduos eletroeletrônico.

Foram levantados estudos com aplicação de técnicas da metalurgia para tratamento e extração de metais dos REEE, de anos de publicação e nacionalidades diferentes a fim de fazer um comparativo das técnicas que vem sendo estudadas no mundo e buscar a melhor alternativa para a recuperação dos resíduos eletroeletrônico considerando diversas variáveis, entre elas: viabilidade econômica, menor impacto ambiental, maior eficiência de extração dos metais e facilidade de aplicação.

Nos resultados serão apresentados, resumidamente, os trabalhos selecionados para o estudo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Resultados

Abaixo serão apresentados, resumidamente, alguns dos trabalhos estudados de recuperação de metal de REEE utilizando as técnicas descritas na revisão bibliográfica. Após, faremos uma discussão sobre os estudos levantados.

5.1.1 Processos mecânicos

Veit em 2001 estudou o processo de tratamento mecânico para PCI. O procedimento iniciou-se pela cominuição das placas, o material triturado em 3 diferentes faixas granulométricas ($F < 0,25$ mm, $0,25 < F < 0,5$ mm, $0,5 < F < 1,0$ mm). Depois realizou separação por diferença de densidade utilizando uma solução de tetrabromoetano (densidade de $2,96 \text{ g/cm}^3$) diluído com acetona na proporção 1:0,27. A diluição foi feita para tornar o processo de separação mais rápido, reduzindo a densidade para $2,5 \text{ g/cm}^3$ e baixar a viscosidade. A separação ocorreu em 2h, obtendo frações pesadas (ricas em metais) e frações leves (ricas em plásticos e cerâmicos) nas três diferentes granulometrias. Em seguida, as amostras foram analisadas quimicamente, comprovando que os principais metais estavam concentrados nas frações pesadas. Com esta metodologia foi possível concentrar cerca 35% dos metais, presentes nas placas, somente com a cominuição e classificação granulométrica. Com a separação por densidade obteve-se na fração afundada uma concentração de mais de 80% de metais, sendo que destes aproximadamente 65% eram cobre. Realizando alguns cálculos a conclusão foi que para cada 100 kg de PCI era possível obter 16,4 kg de metal, sendo que 8,3 kg eram cobre.

Xu et al. (2000) estudaram a utilização do processo mecânico para reciclagem das PCI. Na etapa de cominuição foi utilizado, inicialmente, um britador e após o material foi encaminhado para um moinho de martelos. A separação granulométrica ocorreu com o uso de peneiras para se obter granulometrias

inferiores a 1,2 mm. O material foi encaminhado para um separador eletrostático, objetivando obter uma fração com metais e outra com não metais. As amostras com tamanho entre 1,2 e 0,6 mm apresentaram melhor separação. Este estudo concluiu que cerca de 70% da composição das PCIs são materiais não metálicos (como cerâmicas, resina de fenol formaldeído, fibra de vidro, retardadores de chama bromados). Objetivando a correta disposição desta sucata não metálica, foram adicionados alguns aditivos ao material não metálico e, em seguida, o mesmo foi prensado a quente. As placas compostas com aproximadamente 80% em massa de materiais não metálicos podem ser utilizadas como material para construção (telhas, divisórias, placas de isolamento, etc.).

5.1.2 Pirometalurgia

Em 2008, Jie et al. estudaram a pirólise como uma alternativa de reciclagem de PCI. O principal objetivo do experimento foi determinar a composição dos efluentes produzidos no reator da pirólise. Durante o processo de pirólise, a parte orgânica foi decomposta em piro-óleos e piro-gases. A pirólise foi realizada em um reator acoplado a um forno tubular, sob atmosfera de nitrogênio. A amostra foi aquecida a temperaturas de 300, 400, 500, 600 e 700°C, por um tempo de 30min. O vapor condensado ficou armazenado em um copo na temperatura de gelo/água e o não condensado foi coletado separadamente. A fase sólida, 75-80%, obtida após a pirólise, consistiu principalmente de fibra de vidro, metais e carbono. O líquido obtido durante o processo de pirólise, cerca de 9% em massa, era constituído de uma mistura de compostos orgânicos aromáticos e oxigenados (geralmente denominado óleos). A fase gasosa, 13% em massa, era composta principalmente de hidrocarbonetos leves C4-C1 e CO, CO₂, H₂ e O₂ e poderia servir de gás para fins energéticos, uma vez que seu poder calorífico foi de aproximadamente 70 MJ/kg.

5.1.3 Hidrometalurgia

Martins (2007) em seu trabalho estudou extração de estanho e cobre de PCI através de lixiviação e recuperou as espécies através de precipitação por neutralização do licor de lixiviação. As PCI foram previamente desmontadas, fragmentadas em moinhos de cilindros e peneiradas, obtendo-se um produto com granulometria inferior a 0,208 mm. O material foi lixiviado com soluções aquosas 2,18N de H_2SO_4 , 2,18N H_2SO_4 +3,0N HCl, 3,0N HCl e 3,0N HCl+1,0N HNO_3 , a uma temperatura de 60 °C com agitação intensa. O resíduo sólido das etapas de lixiviação foi recolhido por centrifugação, seco em estufa a 60 °C por 24 h e pesado. Os precipitados ricos em Cu e Sn, obtidos através da neutralização dos licores de lixiviação com NaOH, foram recolhidos por centrifugação, secos em estufa, pesados e encaminhados para caracterização. O procedimento de neutralização dos licores de lixiviação através da neutralização da solução aquosa com a adição sucessiva de lentilhas de NaOH(PA) foi bem sucedida. A lixiviação com água-régia, 3,0N HCl + 1,0N HNO_3 , apresentou os melhores resultados de extração para Sn e Cu, respectivamente 98 e 93%, enquanto que os piores resultados foram para o sistema 2,18N H_2SO_4 (Sn 2,7% e Cu <0,01%).

Sheng e Etsell (2007) estudaram a recuperação de ouro utilizando água régia no procedimento hidrometalúrgico de lixiviação. Primeiramente, foram separaram os chips da placa de circuito impresso (placa de fibra de vidro) utilizando solução com uma parte de HNO_3 concentrado e duas partes de água, a 70 °C por 1 h. Sob estas condições os metais base (cobre, ferro, níquel, estanho, chumbo, alumínio e zinco) foram dissolvidos. Após a primeira lixiviação, os chips e a resina foram triturados mecanicamente e uma nova lixiviação, nas mesmas condições anteriores, solubilizou os metais base remanescentes. Após, foi realizada a lixiviação dos resíduos da segunda fase com água-régia (mistura com proporção 3:1 de HCl concentrado e HNO_3 concentrado), para dissolver o ouro metálico (Au^0 oxidado a Au^{3+}).

A conclusão do trabalho foi:

- Um método eficaz para recuperar o ouro de sucata PCI envolve as seguintes etapas: (1) lixiviação em um sistema de ácido nítrico em água; (2) esmagamento mecânico de chips de computador e resina coagulada; (3) lixiviação do chip num sistema de ácido nítrico em água;

(4) lixiviação do resíduo sólido em um sistema de água-régia; e (5) precipitação de ouro com sulfato ferroso;

- A quantidade de solução ideal para a imersão de chips de computadores é de aproximadamente 2 mL/g de chips de computador;
- O ouro foi precipitado a partir do lixiviado com sulfato ferroso; temperaturas mais elevadas tendem a dar mais rápidas taxas de lixiviação de ouro.

Syed (2006) estudou a extração de ouro de PCI, pulseiras revestidas de ouro e espelhos revestidos de ouro. As investigações laboratoriais foram realizadas sobre a aplicação de um método hidrometalúrgico usando os reagentes comumente disponíveis e baratos, o ácido fórmico e persulfato de potássio. A técnica baseou-se no aquecimento do material de sucata, juntamente com um reagente, 20% de solução de ácido fórmico à temperatura para separar o componente inorgânico a partir da resina epoxi em espelhos revestidos a ouro fervente. A dissolução de metais básicos é afetada usando um agente oxidante forte, de 20% de persulfato de potássio e aquecido até à temperatura de ebulição. A recuperação do ouro foi obtido por fusão.

A conclusão do trabalho foi:

- O processo é simples e de baixo custo e pode ser aplicado para o tratamento de vários materiais de alimentação, mas o mais adequado é sucata PCI revestidos a ouro e os que contêm baixos níveis de metais de base que consomem persulfato. Uma parte do custo de persulfato pode ser recuperado a partir da venda de potássio, de sódio ou sulfato de amônio subproduto. A recuperação de metais comuns, como subprodutos do sulfato filtrado também é possível por meio de métodos químicos e electroquímicos;
- O ácido fórmico e o persulfato de potássio são não-tóxicos e não poluem o meio ambiente. Mesmo os seus produtos de degradação, como CO₂ e H₂O e sulfato de potássio são "eco-friendly". Assim, este processo deve ser prontamente adotado como uma tecnologia "verde" simples e para a recuperação de ouro de todos os tipos de sucatas;

- O processo pode ser ampliado e adotado por todas as categorias de indústrias.

Moraes (2011) estudou a recuperação de cobre de PCI por meio de métodos hidrometalúrgicos. Em seu trabalho iniciou com processos mecânicos, utilizou como técnica a moagem, que foi realizada com moinho de martelo com grelha de 6,4 e 2mm, seguida de separação magnética e eletrostática. Posteriormente foi feita a classificação granulométrica com peneiras vibratórias com malhas de 2, 1, 0,5, 0,25 e 0,106mm. Depois foi feita a caracterização por meio de pirólise com forno tipo mufla a 800°C por 1 hora. Foi feito um ensaio de digestão com água régia utilizando solução 3:1 para HCl:HNO₃ e análise química de espectroscopia de emissão óptica por indução plásmica. Após a caracterização foi identificado que o material não magnético era a fração que apresentava maior concentração de cobre, fração ideal para hidrometalurgia, que ocorreu em duas etapas com ácido sulfúrico e na presença de peróxido de hidrogênio. Os resultados da caracterização mostraram que as PCI após a moagem apresentam 24% de cerâmicas, 12,7% de polímeros e 63,3% de metais. O procedimento mostrou-se eficiente, recuperando 99% do cobre das PCI em ambas situações.

Akcil et al. (2012) estudaram o processo de lixiviação oxidativa para a extração de metais preciosos de interesse econômico. Um processo de duas fases baseado em lixiviação ácida oxidante de metais (Cu, em particular), seguido de lixiviação de metais preciosos usando cianeto, tiosulfato, tioureia ou halogeneto como lixiviante (s) pode ser apropriadamente desenvolvido para o tratamento hidrometalúrgico de REEE. Concluiu-se no seu trabalho que os processos hidrometalúrgicos aplicados apresentaram custos relativamente baixos de capital, sem a formação de gás / poeira, seletividade operacional e adequação para aplicações de pequena escala são alternativas positivas para o tratamento de REEE. Meios à base de cloreto (juntamente com recuperação eletrolítica de metais e regeneração de cloro, em particular), que recebeu o maior interesse, tem o potencial para a extração de metais preciosos e de base em uma única fase de lixiviação.

5.1.4 Biometalurgia

Brandl, Bosshard e Wegmann (1999) aplicaram processos microbiológicos para a lixiviação de metais a partir do REEE. As bactérias *Thiobacillus thiooxidans* e *T. ferrooxidans*, e fungos *Aspergillus niger* e *Penicillium simplicissimum* foram cultivados na presença de resíduo eletrônico. A adição de quantidades elevadas de resíduos eletrônicos levou ao aumento do pH inicial (devido à alcalinidade dos resíduos). A fim de reduzir os efeitos tóxicos sobre os micro-organismos, o processo foi dividido em duas etapas: os organismos foram cultivados na ausência de sucata eletrônica e, a sucata eletrônica foi adicionada, em diferentes concentrações, aos micro-organismos formados para solubilização de metais. Em concentrações de sucata de 5 e 10 g/L, as bactérias lixiviaram mais de 90% de Al, Cu, Ni e Zn. Ambas as espécies de fungos mobilizaram 65% de Cu e Sn, e mais de 95% de Al, Ni, Pb e Zn.

Yamani (2012), em sua tese investigou a recuperação de metais (principalmente ouro) de PCI de computadores obsoletos através de processos biometalúrgicos. Primeiramente, as placas passaram por um processo de cominuição seguido de separação magnética e eletrostática. Para o processo de biolixiviação, foi utilizada a bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans* – LR, que foi cultivada e adaptada na presença de PCI. Também foi estudada a lixiviação com sulfato férrico para efeitos de comparação. Após o processo de biolixiviação e lixiviação com sulfeto férrico, foram realizados ensaios de cianetação. Os resultados da caracterização mostraram que através da separação magnética é possível obter duas frações: o material magnético, na qual ficou concentrado o ferro, permitindo posterior recuperação, e material não-magnético, na qual ficou concentrado o cobre, zinco, alumínio, estanho e ouro. A lixiviação com sulfato férrico extraiu menos de 35% de cobre do que a biolixiviação, porém é um fator contribuinte assim como a lixiviação com ácido sulfúrico. A biolixiviação do material não-magnético de PCI extrai 99% do cobre. O ensaio de cianetação permitiu a extração de 85% de ouro presente no material insolúvel após a biolixiviação e a lixiviação.

5.1.5 Eletrometalurgia

Veit em 2005 estudou a recuperação de cobre em PCI através de processos mecânicos e eletrometalúrgicos, Figura 5. Desta vez utilizou cominuição, classificação granulométrica, separação magnética, separação eletrostática e, por fim, eletro-obtenção para recuperar cobre. As PCI sofreram cominuição em moinho de facas a 1 mm, seguida por uma separação granulométrica ($F < 0,25$ mm, $0,25 < F < 0,5$ mm, $0,5 < F < 1,0$ mm). O material foi colocado em um separador magnético por via seca. Duas frações foram separadas, uma magnética contendo principalmente Fe e Ni e outra não magnética contendo os metais restantes, polímeros e materiais cerâmicos. A fração não magnética foi encaminhada para um separador eletrostático. Os produtos obtidos foram analisados quimicamente por espectroscopia de absorção atômica para determinar a quantidade de metais presentes. A eletro-obtenção foi realizada com as duas soluções da fração de maior granulometria das PCI, uma dissolvida em ácido sulfúrico e outra em água-régia.

Neste trabalho Veit concluiu que:

- Nas etapas iniciais (cominuição e classificação granulométrica) houve dificuldade de fragmentação das PCI e que os metais tendem a se concentrar nas frações mais grosseiras;
- A fração magnética existente é muito pequena (de 9 kg de sucata tratadas somente 230 g foram separadas, porém com elevado teor de Fe, cerca de 42%); as frações de PCI separadas eletrostaticamente apresentaram em média 50% de cobre, 25% de estanho e 7% de chumbo;
- A eletro-obtenção possibilitou recuperar cobre, sendo o principal elemento depositado, com um rendimento superior a 97%, porém se mostrou ineficiente para a recuperação de outros metais como estanho e chumbo.
- Na estimativa de custo o valor mostrou-se bastante elevado inviabilizando a técnica.

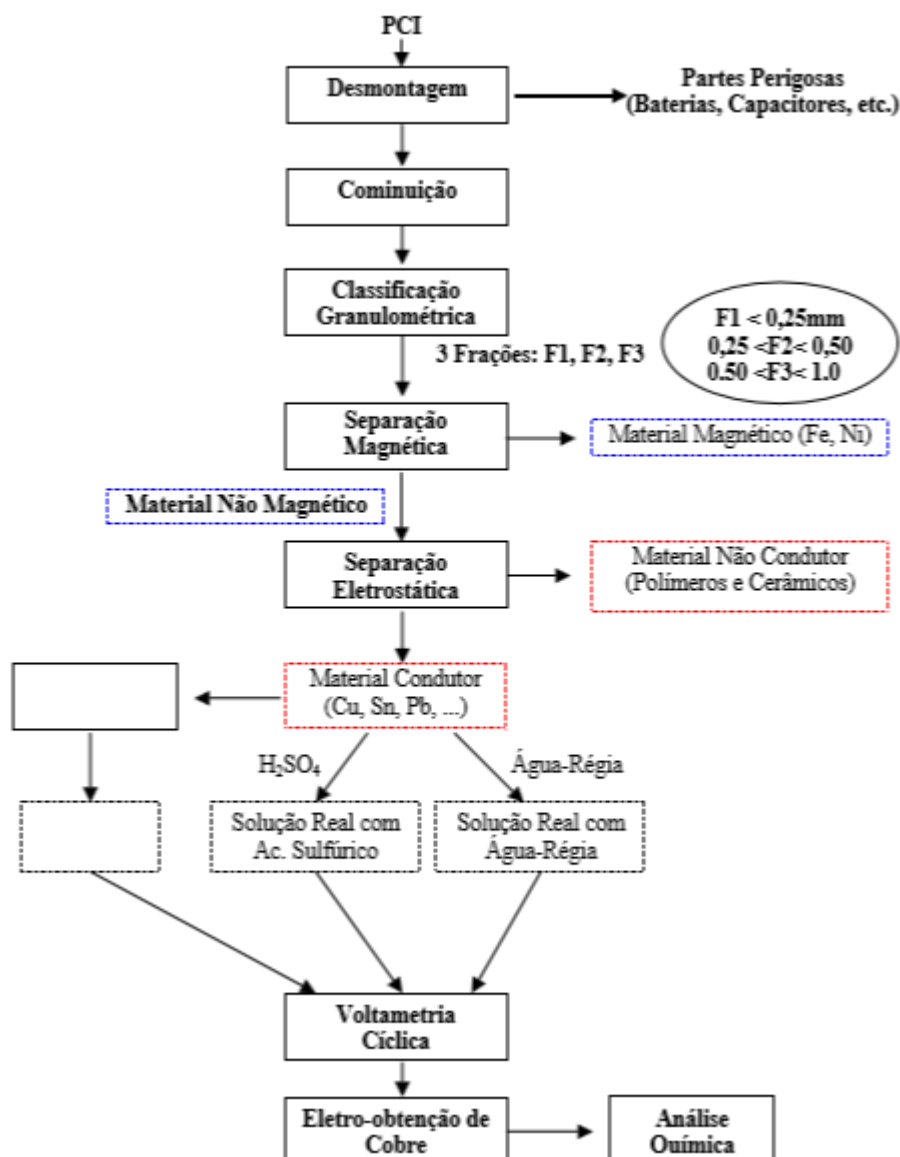


Figura 6 - Fluxograma das etapas do processo utilizado por Veit, 2005.

Fonte: VEIT (2005)

Veita et al (2006) estudaram a reciclagem de PCI utilizando processos mecânicos e eletrometalúrgicos. Na primeira fase deste trabalho, o resíduo passou pela cominuição, seguido por granulometria, separação magnética e eletrostática, nesta ordem. Por este processo, foi possível obter uma fração concentrada em metais (principalmente Cu, Pb e Sn) e uma outra fração contendo polímeros e material cerâmicos. O teor de cobre atingiu mais do que 50% em massa na maioria das frações de condutores e significativo teor de chumbo e estanho. Na segunda fase, a fração concentrada em metais foi dissolvida com ácidos e tratada com

processos eletroquímicos (neste trabalho foi utilizada a eletro-obtenção), a fim de recuperar os metais separadamente, especialmente cobre. Os resultados demonstram a viabilidade técnica de recuperação de cobre usando processamento mecânico seguido de uma técnica eletrometalúrgica. O teor de cobre em solução decaiu rapidamente em todas as experiências e o cobre obtido por via eletrolítica foi acima de 98%, na maioria dos testes.

5.2 Resumo dos trabalhos estudados

A tabela a seguir apresenta os trabalhos resumidamente correlacionando-os.

Tabela 6 - Resumo dos trabalhos de recuperação de metais de REEE estudados.

Técnica	Autor	Ano	Objetivo	Procedimento
Processos Mecânicos	VEIT	2001	Caracterização da PCI.	Cominuição; separação granulométrica e separação por densidade.
	XU et al	2000	Extração de Cu	Cominuição, separação granulométrica e separação eletrostática.
Pirometalurgia	JIE et al	2008	Análise de efluentes do reator na pirólise.	Aquecida a temperaturas de 300, 400, 500, 600 e 700°C.
Hidrometalurgia	MATINS	2007	Extração de Sn e Cu de PCI.	Processos mecânicos, seguido de lixiviação com soluções diferentes.
	SHENG ETSELL e	2007	Recuperação de ouro de PCI.	Lixiviação; seguido de esmagamento mecânico e lixiviação; precipitação de ouro com sulfato ferroso.
	SYED	2006	Extração de ouro de sucatas.	Aquecimento do metal com ácido fórmico; seguido de lixiviação e aquecido. A recuperação do ouro foi obtido por fusão.
	MORAES	2011	Recuperar cobre de PCI.	Processos mecânicos, seguido de lixiviação com ácido sulfúrico, depois com peróxido de hidrogênio.

Hidrometalurgia	AKCIL et al	2012	Recuperação de metais preciosos.	Duas fases: lixiviação ácida, seguido de lixiviação de metais preciosos usando cianeto, tiosulfato, tioureia ou halogeneto.
Biometalurgia	BRANDL, BOSSHARD e WEGMANN	1999	Lixiviação de metais presentes REEE	O REEE foi adicionado em diferentes concentrações, aos micro-organismos formados para solubilização de metais.
	YAMANI	2012	Recuperar Au de PCI.	Processos mecânicos, seguido de biolixiviação. A recuperação foi feita através da cianetação.
Eletrometalurgia	VEIT	2005	Recuperar cobre em PCI	Processos mecânicos seguidos por eletro-obtenção.
	VEITA et al	2006	Recuperar metais.	Processos mecânicos seguido de eletro-obtenção.

5.3 Vantagens e desvantagens da utilização dos processos estudados

As vantagens e desvantagens dos processos estudados estão relacionados na tabela a seguir.

Tabela 7 - Vantagens e desvantagens da utilização de técnicas de metalurgia na recuperação de metais de REEE.

Técnica	Vantagem	Desvantagem
Processo Mecânico	Eficiente na concentração de metais na fase sólida; Eficiente na classificação do material.	Muitas etapas; Baixa eficiência na recuperação de metais, necessitando etapa posterior de refinamento.
Pirometalurgia	Aceita qualquer tipo de REE; não requerer pre-tratamento; pode ser realizado em poucas etapas.	Poluição do ar; os metais podem ser perdidos através da volatilização de seus cloretos; perda de metais nobres e metais bases devido a presença de cerâmica e vidro; a recuperação de outros metais é baixa ou zero.
Hidrometalurgia	Baixo impacto ambiental; separação mais fácil dos principais componentes do REEE; menor custo em relação à pirometalurgia.	Dificuldade em aceitar REEE mais complexos; necessidade de redução de volume; demanda grandes volumes de soluções; produz efluente contendo elementos corrosivos e/ou tóxicos; geração de resíduos sólidos.
Biometalurgia	Mais barato; demanda de energia menor se comparado com os pirometalúrgicos; necessita de menor mão-de-obra especializada; não emite poluentes na atmosfera; simplicidade nas instalações.	Longos períodos de “ataques”; e a necessidade dos metais estarem expostos.
Eletrometalurgia	Realizado em poucas etapas; alta eficiência na recuperação dos metais; baixa perda de metais preciosos; é aplicável em todos os tipos de REEE; o eletrólito pode ser reciclado.	O REEE tem que ser pré-classificado. Alto custo comparado com as demais técnicas.

5.4 Discussão

Dos trabalhos apresentados acima, podemos observar que:

- Os trabalhos que utilizaram apenas processos mecânicos (Veit e Xu) mostraram-se eficientes para caracterização do material a ser reciclado e definição de melhor técnica a ser utilizada, porém evidenciam a necessidade de etapas posteriores para o beneficiamento e refino dos metais;
- A maioria dos trabalhos apresentados estudaram a recuperação do Cu, por ser um metal de grande interesse econômico e em maior proporção nas PCI. O modelo proposto por Moraes (2011) mostrou-se ser o mais eficiente na recuperação desse metal, com taxa de extração de 99% utilizando técnicas de hidrometalurgia. Martim em 2007, também estudou a extração de Cu de PCI por meio de hidrometalurgia, porém utilizou a lixiviação em uma etapa, diferente de Moraes que realizou duas etapas de lixiviação, e obteve uma eficiência de 93% do Cu. Brandl, Bosshard e Wegmann (1999) pesquisaram a biolixiviação, porém conseguiram extrair apenas 65% do Cu. Veit (2005) e Veita et al (2006), estudaram a extração do Cu por eletro-obtenção (técnica eletrometalúrgica), obtiveram um desempenho semelhante (97% e 98% de extração de cobre, respectivamente) um desempenho considerável porém não tão bom quanto Moraes, e os processos apresentaram alto custo, inviabilizando economicamente;
- Muitos estudos estão sendo desenvolvidos para a recuperação do ouro das PCIs. Dentre os apresentados Sheng e Etsell (2007) assim como Syed (2006), estudaram a extração de Au por meio de processos hidrometalúrgicos. Enquanto Yamani (2012) utilizou técnicas biohidrometalúrgicas para a extração do metal. Os três trabalhos apresentaram resultados interessantes. Syed buscou reagentes baratos e fáceis de encontrar no mercado (o ácido fórmico e persulfato de potássio), também considerou as questões ambientais (os reagentes escolhidos são não-tóxicos e não poluem o meio ambiente, o autor definiu como “eco-friendly”), e a recuperação do ouro foi feita por fusão. Yamini (2012) também considerou fatores ambientais e econômicos em sua pesquisa, já

que a biolixiviação das técnicas apresentadas é a menos poluente e mais barata;

- Das técnicas apresentadas, a que demonstrou maior eficiência na recuperação de metais de REEE foram as de hidrometalurgia, antecedidas por processos mecânicos. Também apresentaram um bom desempenho ambiental e econômico, com a produção de poucos (ou nenhum) poluentes em seu processo, com possibilidade de recuperação dos reagentes utilizados no processo, e baixo custo de aplicação.

6 CONCLUSÕES

As seguintes conclusões podem ser obtidas a partir dos trabalhos apresentados e discutidos:

- Em todos os trabalhos observou-se que não é aplicada apenas uma técnica para a reciclagem do REEE, geralmente são combinadas diversas técnicas a fim de garantir maior desempenho na extração dos metais presentes no lixo eletrônico;
- É importante realizar previamente a caracterização do material a ser reciclado para escolher o melhor procedimento para obter a maior eficiência na reciclagem do material;
- A utilização de processos mecânicos como etapa inicial do processo de reciclagem dos REEE auxilia a caracterização do material, e também aumenta a exposição do metal, facilitando seu refinamento e beneficiamento nas etapas posteriores;
- O metal mais estudado é o cobre, por apresentar maior proporção entre os metais nas PCIs, e por ter grande importância econômica;
- As pesquisas em hidrometalurgia de REEE parecem centrar-se, primeiramente, na lixiviação de metais valiosos. O tratamento hidrometalúrgico de REEE muitas vezes envolve um processo de lixiviação de dois estágios para a extração de metais de base e metais preciosos em seguida;
- A extração de metais preciosos, que muitas vezes contribuem extensivamente para o valor dos REEE é de importância crucial para a economia de uma operação de reciclagem;
- A diversidade de metais presentes e complexidade de metal-metal e associações não-metal-metal implica em dificuldades específicas para o desenvolvimento de processos de tratamento de REEE;
- No caso das placas de circuito impresso, a diferença de condutividade elétrica entre os metais e os não metais é condição fundamental para o bom resultado da técnica. É possível separar os materiais não condutores

(polímeros e materiais cerâmicos) dos condutores (metais como Cu, Pb, Sn, entre outros);

- As frações de não condutores (que contêm polímeros e cerâmicas) devem ser avaliadas em separado para ser devidamente eliminadas ou serem enviadas para os processos de reciclagem de polímeros e cerâmicas;
- As técnicas biohidrometalúrgicas e hidrometalúrgicas, são as consideradas mais “limpas” e com os menores custos, e vem ganhando destaque nas pesquisas atuais.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 10004. Resíduos Sólidos – classificação. Rio de Janeiro . 71p. 2004

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 10005. Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos – Procedimentos. Rio de Janeiro . 16p. 2004

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 10006. Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos – Procedimentos. Rio de Janeiro . 3p. 2004.

AKCIL, A.; TUNCUK, A.; STAZI, V.; YAZICI, E. Y.; DEVECI, H. **Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling.** Minerals Engineering 25, 28-37p. 2012.

ANDRADE, R. **Caracterização e Classificação de Placas de Circuito Impresso de Computadores como Resíduos Sólidos.** Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade de Campinas. 143p. 2002

BRANDL, H.; BOSSHARD, R.; WEGMANN, M. **Computer-munching microbes: metal leaching from electronic scrap by bacteria and fungi.** Hydrometallurgy 59, 319 – 326p. 2001.

BRASIL. **Lei Federal 6.938, de 31 de agosto de 1981.** Dispõe sobre a Política Nacional de Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 31 de agosto de 1981.

BRASIL. **Lei Federal 12.305, de 02 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 03 de agosto de 2010.

CORDOBA, R. E. **Estudo do gerenciamento integrado de resíduos de construção e demolição do município de São Carlos – SP.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 406p. 2010.

CUI, J. e ZANG, L. **Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review.** Journal of Hazardous Materials 158. 228-256p. 2008.

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

FAILLA, V. **Análise comparativa do Plano Nacional de Resíduos Sólidos e do Plano Nacional de Saneamento Básico, quanto à gestão municipal dos resíduos sólidos.** Trabalho de Graduação. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 90p. 2014.

FIGUEIREDO, P. J. M. **Os Resíduos Sólidos e sua Significação Frente ao Impasse Ambiental e Energético da Atualidade.** Campinas, 1992. 227 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.

FRACASSI, L. B. **Gestão e gerenciamento de resíduos sólidos em eventos sustentáveis: estudo de caso do II Simpósio sobre Resíduos Sólidos da USP de São Carlos.** Trabalho de Graduação. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 86p. 2012.

HOFFMANN, J.E. **Recovery of Precious Metals from Electronic Scrap.** Journal of Metals, v. 44, pp. 43 - 48. 1992.

JIE, G.; YING-SHUN, L.; MAI-XI, L. **Product characterization of waste printed circuit board by pyrolysis.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, vol. 83, p.185-189, 2008.

LI, J.; LU, H.; GUO, J.; XU, Z.; ZHOU, A. Y. **Recycle Technology for recovering resources and products from waste printed circuit board**. Environ. Sci. Technol, 41, 1995-2000p. 2007.

LOPES, A. A. **Estudo da gestão e do gerenciamento integrado dos resíduos sólidos urbanos no município de São Carlos (SP)** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 194p. 2003.

MACÊDO, J. C. **Lixo tecnológico, contexto e soluções**. Monografia – Instituto de Matemática, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 51p. 2009.

MARTINS, A. H. **Recuperação de estanho e cobre a partir da reciclagem de placas de circuito eletrônico de microcomputadores sucataados**. Estudos tecnológicos vol. 3. 124-131p. 2007.

MANZINE, E.; VEZZOLI, C. **O desenvolvimento de Produtos Sustentável**, São Paulo – EDUSP, 2005.

MORAES, V. T. **Recuperação de metais a partir do processamento mecânico e hidrometalúrgico de placas de circuito impresso de celulares obsoletos**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 135p. 2011.

PARANÁ (ESTADO). **Lei Estadual 15.851, de 10 de junho de 2008**. Dispõe a respeito do gerenciamento dos equipamentos de informática. Diário Oficial do Estado do Paraná. 11 de julho de 2008.

PERNAMBUCO (ESTADO). **Decreto 23.941, de 11 de janeiro de 2002**. Regulamenta a Lei Estadual 12.008, de 01 de junho de 2001, que dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos, e dá outras providências. Diário Oficial do Estado de Pernambuco, Recife. 11 de janeiro de 2002.

PERNAMBUCO (ESTADO). **Lei Estadual 14.236, de 13 de dezembro de 2002.** Dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos, e dá outras providências. Diário Oficial do Estado de Pernambuco, Recife. 14 de dezembro de 2002.

RIBEIRO, P. P. M. **Concentração de metais contidos em placas de circuito impresso de computadores descartados.** Monografia. Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. 66p. 2013.

RIBEIRO, J. C. J. **Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos.** Belo Horizonte, Cetro Mineiro de Referência em Resíduos – CMRR, 22 fev. 2011. Palestra proferida por ocasião do “Seminário Internacional sobre Resíduos de Equipamentos Eletrônicos”, Belo Horizonte.

RODRIGUES, A. C. **Impactos socioambientais dos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos: estudo da cadeia pós-consumo do Brasil.** Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Metodista de Piracicaba. 321p. 2007.

SANTA CATARINA (ESTADO). **Lei Estadual 14.364, de 25 de janeiro de 2008.** Altera o inciso VII do art. 5 da Lei 13.557, de 2005, que dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos. Diário Oficial do Estado de Santa Catarina, Florianópolis, 26 de janeiro de 2008.

SÃO PAULO (ESTADO). **Lei Estadual 13.576, de 06 de julho de 2008.** Institui normas e procedimentos para a reciclagem, gerenciamento e destinação final de lixo tecnológico. Diário Oficial do Estado de São Paulo, 07 de julho de 2008.

SÃO PAULO (ESTADO). **Resolução SMA-038, de 02 de agosto de 2011.** Estabelece a relação de produtos geradores de resíduos de significativo de impacto ambiental, para fins do disposto no artigo 19, do Decreto Estadual 54.645, de 05 de agosto de 2009.

SHENG, P. P. e ETSELL, T. H. **Recovery of gold from computer circuit board scrap using aqua regia.** Waste Management and Research. 380-303p. 2007.

SYED, S. **A green technology for recovery of gold from non-metallic secondary sources.** Hydrometallurgy 82, 48 – 56p. 2006.

SYED, S. **Recovery of gold from secondary sources: A review.** Hydrometallurgy 115-116, 30 – 51p. 2012.

VEIT, H. M.; BERNARDES, A. M.; FERREIRA, J. Z.; TENÓRIO, J. A. S. MALFATTI, C. F. **Recovery of copper from printed circuit board scrap by mechanical processing and electrometallurgy.** Journal of Hazardous Materials B137. 1704-1709p. 2006.

VEIT, H. M. **Reciclagem de Cobre de Sucatas de Placa de Circuito Impresso.** Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 101p, 2005.

VEIT, H. M. **Emprego de Processamento Mecânico Para Reciclagem De Sucata De Placas De Circuito Impresso.** Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2001.

YAMANI, L. H. **Recuperação de metais de placas de circuito impresso de computadores obsoletos através de processo biohidrometalúrgico.** Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 145p. 2012.

YUN, Y. S.; KWAK, I. S.; BAE, M. A.; WON, S. W.; MAO, J.; SNEHA, K.; PARK, J.; SATHISHKUMAR, M. **Sequential process of sorption and incineration for recovery of cyanide solutions: Comparison of ion Exchange resin, activated carbon and biosorbent.** Chemical Engineering Journal 165, 440-446p. 2010.

WIDMER, R., KRAPF, H. O.; KTHETRIWAL D. S., SCHNELLMANN, M., BONI, H. Global perspectives on e-waste, **Environmental Impact Assessment Review**, Volume 25, n. 5, p. 436-458 Elsevier, 2005.