



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

INSTITUTO DE QUÍMICA

**DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS PARA RECUPERAÇÃO DE  
MATERIAIS MAGNÉTICOS, NÃO MAGNÉTICOS E POLÍMEROS  
PROVENIENTES DE RESÍDUO ELETRÔNICO**

RAISSA GABRIELA MARTINS REIS BARROSO

BRASÍLIA, 2016

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

INSTITUTO DE QUÍMICA

RAISSA GABRIELA MARTINS REIS BARROSO

**DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS PARA RECUPERAÇÃO DE  
MATERIAIS MAGNÉTICOS, NÃO MAGNÉTICOS E POLÍMEROS  
PROVENIENTES DE RESÍDUO ELETRÔNICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade de Brasília, como parte das  
exigências do programa de graduação em  
Química Tecnológica, para obtenção do título de  
Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Moreira da Silva

BRASÍLIA, 2016

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus, pelo dom da vida e por interceder na minha vida, enchendo-a de vitórias e alegrias. A Ele, toda honra e glória.

Agradeço a meus pais por todo apoio e incentivo que me foi dado desde sempre. Graças aos senhores, tive tantos privilégios na vida. Obrigada por todos os valores que me ensinaram, vocês são meus melhores exemplos de seres humanos. Eu amo vocês imensamente.

Obrigada, minha irmã Laís, meus avós e demais familiares que contribuíram e torceram para essa conquista. Obrigada, meu namorado, Pedro Rafael, por todo apoio, dedicação e por estar sempre presente. Vocês são imprescindíveis para mim.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fábio, que me acolheu desde o segundo semestre de graduação. Obrigada por toda ajuda e por estar sempre presente, mesmo com tantos compromissos. Levarei um pedaço da usina sempre comigo.

Aos meus amigos, que acompanharam os momentos felizes e tristes, deram força e ajudaram sempre que possível. Aos mestres e funcionários da Universidade de Brasília que, de alguma forma, contribuíram para minha formação pessoal e profissional.

Por fim, os meus sinceros agradecimentos a todos que torcem por mim, acreditam no meu potencial e que fazem parte da minha caminhada.

## RESUMO

O consumo e a produção de eletroeletrônicos sofreram um grande incremento com o avanço tecnológico. Isso faz com que consumidores adquiram novos bens, favorecendo a troca dos equipamentos, mesmo que ainda não estejam obsoletos. Com isso, o aumento de volume de resíduos se torna um problema, visto que tais materiais são dispostos, muitas vezes, juntamente com o resíduo domiciliar. Apesar de ser uma prática comum, provoca graves consequências ao meio ambiente e a saúde da população, visto que tais equipamentos possuem em sua constituição uma grande variedade de metais pesados.

O presente trabalho apresentou um sistema para recuperação de metais e polímeros, de resíduos eletroeletrônicos, a partir de processamentos mecânicos. Entre esses processamentos estão a moagem, classificação granulometria e separação magnética para os metais; para os polímeros foram apresentadas a lavagem e descontaminação, secagem e, por fim, a extrusão. Sistemas com capacidade de processamento para  $1000 \text{ kg.h}^{-1}$  de placas de circuito impresso e para  $200 \text{ kg.h}^{-1}$  de carcaça polimérica foram dimensionados. Concluiu-se que é possível montar um sistema para a recuperação de metais e polímeros a partir de resíduo eletroeletrônico com os equipamentos disponíveis comercialmente.

**Palavras chaves:** Recuperação, metais, polímeros, eletroeletrônico e reciclagem.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Proposta de classificação dos resíduos sólidos segundo a origem. ....	15
Figura 2 - Composição média de uma PCI. ....	20
Figura 3 - Moinho de facas. ....	27
Figura 4 - Princípio de funcionamento de uma extrusora.....	34
Figura 5 - Esquema de funcionamento de um granulador.....	35
Figura 6 - Fluxograma das etapas do processo. ....	38
Figura 7 - Moinho de facas ultra-granulador tipo PANTHER.....	39
Figura 8 - Vista interna do Moinho de facas ultra-granulador tipo PANTHER .....	39
Figura 9 - Separador magnético KDS- 12000.....	40
Figura 10 - Funcionamento do tambor rotatório do separador magnético.....	41
Figura 11 - Fluxograma de sistema de reciclagem da carcaça polimérica.....	42
Figura 12 - Tanque de Lavagem e Descontaminação da marca Gold Press. ....	43
Figura 13 - Secadora oblíqua da marca Gold Press.....	44
Figura 14 - Silo secador NZ SG-400 da marca NZ Philpolymer. ....	45
Figura 15 - Extrusora para plásticos, marca Lessa máquinas .....	45
Figura 16 - resfriamento do “espaguete” produzido na extrusora.....	46
Figura 17 - Granulador Primo 200 E, da marca Automatik .....	47
Figura 18 - Secador SE 4000-2 air knife.....	47
Figura 19 - Rotor com 30 dentes para a produção de pellets. ....	48
Figura 20 - Esquema de funcionamento da granulação.....	48

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Materiais e componentes perigosos nos resíduos eletroeletrônicos.....	18
Quadro 2 - Consumo de Energia na produção Primária e Secundária de Metais (GJ/t. de metal). .....	22

## LISTA DE ABREVIATURAS SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ABS – *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (Acrilonitrila-butadieno-estireno)  
BAN – Basel Action Network  
CCE – Comissão das Comunidades Europeia  
CFC – Clorofluorcarbonetos  
CRT – *Cathode Ray Tubes* (Tubos de Raios Catódicos)  
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente  
Fe – Ferro  
HIPS – High Impact Polystyrene (Poliestireno de alto impacto)  
INESFA – Instituto Nacional das Empresas de Preparação de Sucata Não Ferrosa e de Ferro e Aço  
LCD – *Liquid Crystal Displayer* (Tela de Cristal Líquido)  
Mapa – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento  
Mdic – Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio.  
MMA – Ministério do Meio Ambiente  
mT – mili Tesla  
Ni – Níquel  
ONU – Organização das Nações Unidas  
PCB – Bifenilas Policloradas  
PCI – Placas de Circuito Impresso  
PEV – Ponto de Entrega Voluntária  
PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente  
PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos  
POP – Poluentes Orgânicos Persistentes  
RCD – Resíduos de Construções e Demolições  
RDP – Resíduos Domiciliares Perigosos  
REE – Resíduos eletroeletrônicos  
RSE – Resíduos Sólidos Especiais  
RSI – Resíduos Sólidos Industriais  
RSN – Resíduos sólidos urbanos  
RSR – Resíduos Sólidos Rurais  
RSS – Resíduos de Serviços de Saúde

Si – Silício

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>1.1 OBJETIVOS.....</b>	<b>13</b>
1.1.1 Objetivo Geral.....	13
1.1.2 Objetivos Específicos.....	13
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>14</b>
2.1. Resíduos sólidos .....	14
2.1.1. Resíduos eletrônicos.....	16
2.1.2. Geração de resíduos eletrônicos .....	16
2.2. Composição dos resíduos eletrônicos .....	17
2.3. Placas de circuito impresso.....	19
2.4. Carcaça polimérica dos equipamentos eletrônicos.....	21
2.5. Reciclagem .....	21
2.6. Legislação Ambiental Brasileira.....	23
2.7. Tratamentos dos Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos .....	25
2.7.1. Processamento mecânico .....	26
2.7.2. Eletrometalurgia.....	28
2.7.3. Pirometalurgia .....	28
2.7.4. Hidrometalurgia.....	29
2.8. Tratamento da carcaça polimérica.....	30
2.8.1. Reciclagem mecânica.....	30
2.8.2. Reciclagem química.....	30
2.8.3. Reciclagem energética.....	31
2.9. Equipamentos utilizados para o processamento .....	31
2.9.1. Moinho de facas .....	31
2.9.2. Separador magnético .....	32
2.9.3. Tanque de lavagem e descontaminação .....	33
2.9.4. Secador de polímeros .....	33
2.9.5. Extrusora .....	34
<b>3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA .....</b>	<b>36</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>37</b>

<b>4.1. Sistema de recuperação de material materiais magnéticos e não magnéticos partir da reciclagem de placas de circuito impresso. ....</b>	<b>37</b>
<b>4.1.1. Pré-processamento.....</b>	<b>37</b>
<b>4.1.2. Processamento mecânico .....</b>	<b>38</b>
<b>4.1.2.1. Moagem e classificação granulométrica .....</b>	<b>38</b>
<b>4.1.2.2. Separação Magnética .....</b>	<b>40</b>
<b>4.2. Sistema de reciclagem da carcaça polimérica.....</b>	<b>41</b>
<b>4.2.1. Cominuição da carcaça polimérica.....</b>	<b>42</b>
<b>4.2.2. Lavagem e Descontaminação .....</b>	<b>43</b>
<b>4.2.3. Secagem dos polímeros .....</b>	<b>44</b>
<b>4.2.4. Extrusão.....</b>	<b>45</b>
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>49</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>50</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O resíduo sólido é um dos grandes desafios que a humanidade enfrenta. Além do crescimento muito expressivo da geração de resíduos sólidos, houve mudanças nas características desses resíduos ao longo dos anos, com o desenvolvimento tecnológico. O crescimento populacional e as políticas de incentivo ao consumo desencadearam problemas ambientais relacionados à disposição final desses resíduos. Tal fato mobiliza pesquisadores e autoridades visando soluções para minimizar os seus impactos ambientais.

Entre esses resíduos, encontram-se os eletroeletrônicos, que possuem grande potencial poluente, devido sua composição.

Com o avanço da tecnologia, houve um considerável aumento no consumo de produtos eletrônicos e, mesmo que não tenham chegado ao fim da sua vida útil, são substituídos. Graças ao crescimento do mercado interno, incentivo ao crédito e até isenções pontuais tributárias, os produtos eletrônicos se tornam cada vez mais acessíveis. O consumo crescente faz com que haja a geração de grande volume de resíduos eletrônicos, devido ao descarte indevido. Muitas indústrias e cidades ainda não desenvolveram programas de conscientização da população, coleta e nem destinação adequada para tais produtos. Sendo assim, grande parte da população faz o descarte junto com resíduos domiciliares. A estimativa de resíduos eletrônicos produzidos em 2011 foi de aproximadamente 670 mil toneladas, e entre 2001 e 2030 será de 22,4 milhões de toneladas (FERNANDES, 2014).

Apesar de ser uma prática comum, o descarte inadequado de resíduos eletrônicos traz consequências graves ao meio ambiente, visto que há uma gama de metais e outros compostos potencialmente perigosos ao solo, água e ar. Além disso, esse resíduo poderia ser reutilizado, sendo economicamente viável para as indústrias e amigável para o meio ambiente.

Uma das principais consequências do rápido e crescente consumo e descarte dos equipamentos eletroeletrônicos, além dos impactos do pós-consumo, o contínuo uso de recursos naturais não renováveis, que consome muita energia (RODRIGUES, 2007).

A discussão de técnicas para a recuperação, bem como a caracterização de metais de resíduos de equipamentos eletrônicos tem grande importância, visto que, além da reciclagem, pode ser verificada a composição química de tais equipamentos

eletrônicos, sendo possível dimensionar os possíveis danos que o seu descarte inadequado pode causar.

Fernandes (2014) classifica a recuperação de metais a partir de equipamentos eletrônicos basicamente por três etapas:

- Desmontagem: separação seletiva dos componentes dos equipamentos eletrônicos;
- Beneficiamento: processos mecânicos e metalúrgicos para concentração de materiais e
- Refino: recuperação de materiais.

O presente trabalho tem por objetivo dimensionar um sistema para recuperar materiais magnéticos e não magnéticos de placas de circuito impresso de resíduo eletroeletrônico, ou seja, se dará até a etapa de separação magnética. Será dimensionado, também, um sistema de reciclagem da carcaça polimérica de resíduo eletroeletrônico.

Neste contexto, o presente trabalho propõe dimensionar um sistema para que seja feita a recuperação de materiais magnético e não magnéticos, bem como polímeros, presentes em resíduos de equipamentos eletrônicos, os quais podem então ser posteriormente refinados e reaproveitados.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Dimensionar um sistema para a recuperação de materiais magnéticos e não magnéticos de placas de circuitos impressos, provenientes de resíduos eletrônicos. Dimensionar, também um sistema de reciclagem de polímeros provenientes da carcaça polimérica dos resíduos eletrônicos.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Propor um sistema para a recuperação de materiais magnéticos e não magnéticos utilizando placas de circuito impresso de eletroeletrônicos descartados e de produção de pellets de polímeros reciclados da carcaça desses resíduos eletrônicos.
- Dimensionamento e especificação dos equipamentos a serem utilizados no sistema para recuperação de materiais magnéticos e não magnéticos e para a produção de pellets de polímeros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Resíduos sólidos

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e a norma NBR 10.004/2004, a classificação de resíduos sólidos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, de seus constituintes e características, e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido. A segregação dos resíduos na fonte geradora e a identificação da sua origem são partes integrantes dos laudos de classificação, onde a descrição de matérias-primas, de insumos e do processo no qual o resíduo foi gerado devem ser explicitados. A identificação dos constituintes a serem avaliados na caracterização do resíduo deve ser estabelecida de acordo com as matérias-primas, os insumos e o processo que lhe deu origem.

Schalch e Córdoba (2009), baseados nas definições da ABNT e na Política Nacional de Resíduos Sólidos, propuseram uma nova classificação, como ilustra a Figura 1 em que os diferentes resíduos sólidos são agrupados em quatro categorias básicas:

- Resíduos Sólidos Urbanos (RSU): resíduos sólidos domiciliares, resíduos de serviços de saúde, resíduos de portos, aeroportos, terminais rodoviários e ferroviários, resíduos de construção e demolição, resíduos de poda e capina e por fim os resíduos de serviços – resíduos de feiras livres, resíduos comerciais, resíduos de varrição e os resíduos de limpezas de boca de lobo, parques e jardins;
- Resíduos Sólidos Industriais (RSI): resíduos oriundos de diversas cadeias produtivas industriais;
- Resíduos Sólidos Rurais (RSR): resíduos sólidos oriundos de atividades agropecuárias;
- Resíduos Sólidos Especiais (RSE): rejeitos radioativos, os resíduos domiciliares perigosos (RDP), e os resíduos eletroeletrônicos (REE).

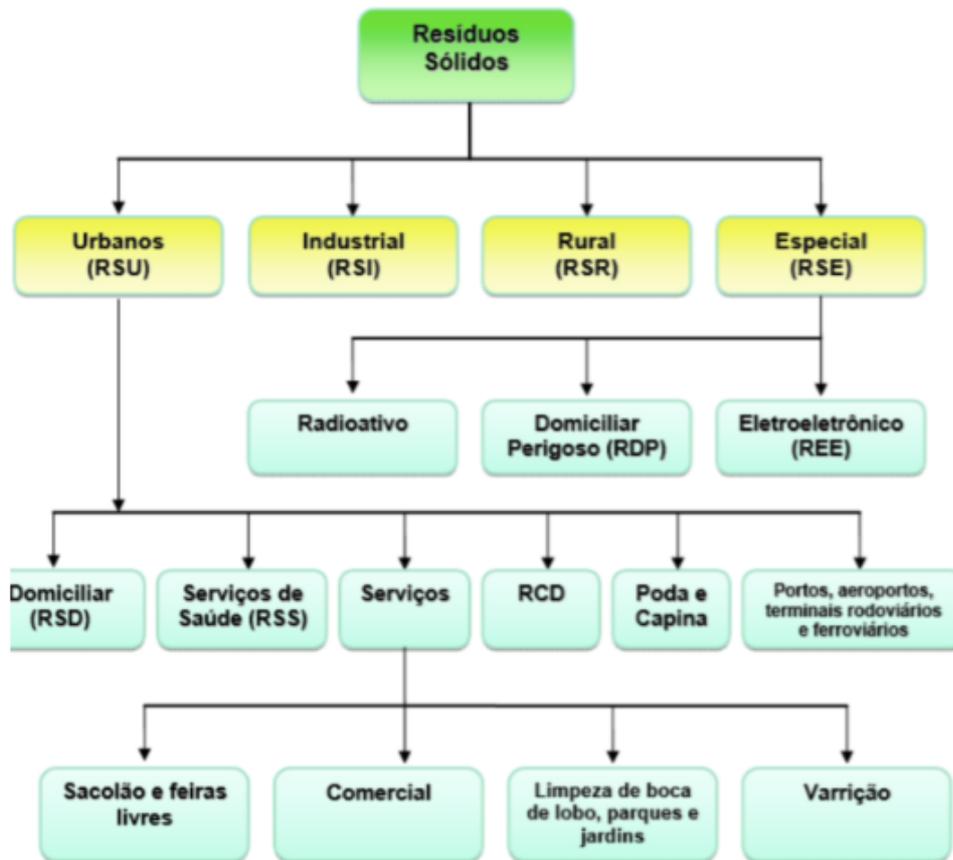


Figura 1 - Proposta de classificação dos resíduos sólidos segundo a origem.

FONTE: SCHALCH e CÓRDOBA (2009)

O tratamento e disposição final de resíduos é o conjunto de técnicas, regulamentadas e monitoradas por órgãos ambientais, de tratamento e disposição de resíduos sólidos, que têm como objetivo eliminar os impactos ambientais e o risco à saúde pública. De acordo com Ambiental (2016), as técnicas a seguir são utilizadas para a disposição de resíduos sólidos.

- Aterro Sanitário é uma técnica que, confina na menor área possível os resíduos em termos de controle de proteção ambiental e saúde pública. É fundamentada em critérios de engenharia e normas técnicas e operacionais específicas.
- A reciclagem consiste, basicamente, da reintrodução dos resíduos no processo de produção. É uma prática que precisa ser difundida, especialmente pela economia da energia gasta nos processos de produção e pela diminuição na utilização de matéria-prima virgem.

- A compostagem constitui-se no processo biológico de decomposição da matéria orgânica contida em restos de origem animal ou vegetal. Esse processo tem como resultado final um composto orgânico, que deve permitir sua aplicação no solo sem ocasionar riscos ao meio ambiente. É muito praticado no meio rural. Para ser aplicado aos resíduos sólidos urbanos, necessita-se de um rigoroso processo de triagem de sua fração orgânica para garantir que esteja livre de componentes tóxicos ou perigosos.
- A incineração é o processo de redução de peso e volume do lixo pela combustão controlada. É utilizada, atualmente, no Brasil, apenas para o tratamento de resíduos hospitalares e industriais, visto que gera dioxinas. É bastante difundida em países desenvolvidos e com pouca extensão territorial e, geralmente, associada à produção de energia (AMBIENTAL, 2016).

#### **2.1.1. Resíduos eletrônicos**

Nos últimos anos, houve um acréscimo significativo tanto na produção quanto no consumo de produtos eletroeletrônicos. Dentre esses estão as geladeiras, os computadores, aparelhos de telefones móveis e fixos, e televisores. Tal fato deve-se graças ao grande desenvolvimento tecnológico e incentivo ao consumo. Com isso, os aparelhos eletrônicos possuem tempo de uso cada vez menor. Sendo assim, maiores quantidades são descartadas, mesmo que ainda desempenhem suas funções (FERNANDES, 2014).

#### **2.1.2. Geração de resíduos eletrônicos**

Alguns pesquisadores adotam o termo “e-lixo”, ou em inglês “e-waste” para tratar de resíduos eletroeletrônicos. De acordo com a ONU, a previsão é que haverá 50 milhões de toneladas de resíduo eletrônico no mundo em 2017. Segundo o relatório divulgado pelo Programa da ONU para o meio ambiente, como a indústria eletrônica é uma das maiores e que mais cresce no mundo e gera até 41 milhões de toneladas de bens como computadores e celulares (PNUMA, 2016).

Com o crescimento econômico, houve o fortalecimento da classe média, maior consumo de eletroeletrônicos e por sua vez maior geração de resíduos.

Tais resíduos quando descartados de maneira inadequada, como em lixões, podem causar sérios riscos ao meio ambiente como um todo. Isso ocorre devido à sua composição heterogênea, rica em diversos metais, tais como ferro, níquel, chumbo, arsênio, ouro, prata e platina. Ou seja, grande parte dos metais pesados presentes em aterros são provenientes de resíduo eletrônico.

Quando em contato com o solo, estes produtos podem vir a contaminar lençóis freáticos. Se queimados, podem contaminar a atmosfera. Se o resíduo eletroeletrônico for disposto dessas maneiras, tem grandes chances de causar graves danos aos catadores e moradores de áreas próximas aos aterros (SANT'ANA, 2011).

De acordo com a resolução 257 da CONAMA, os resíduos sólidos perigosos devem ser entregues pelos usuários aos estabelecimentos que as comercializam, para repasse aos fabricantes ou importadores (estes são os responsáveis por adotarem os procedimentos de reutilização, reciclagem, tratamento ou disposição final ambientalmente adequada). Sendo assim, se faz necessário um tratamento (químico, físico, biológicos ou térmicos) específico para cada resíduo, seguida da disposição em aterros, minas ou armazéns, desenhados especialmente para receber resíduos perigosos.

## **2.2. Composição dos resíduos eletrônicos**

Os equipamentos eletroeletrônicos são compostos por diversos módulos básicos. Comumente são módulos básicos desses produtos placas de circuito impressos, cabos, cordões e fios, plástico antichama, comutadores e disjuntores de mercúrio, equipamento de visualização, como telas de tubos de raios catódicos (*Cathode Ray Tubes* – CRT) e de cristal líquido (*Liquid Crystal Displayers* – LCD), pilhas e baterias, meios de armazenamentos de dados, dispositivos luminosos, condensadores, resistências, sensores e conectores (CCE, 2000).

Para a fabricação de tais produtos são utilizados diversos materiais, podendo variar a composição de acordo com a proporção e finalidade desejada. Em termos de proporção mássica, os principais materiais são: ferro, cobre, plástico, vidro e cerâmicas. Há também materiais que são empregados em pequenas quantidades, como borracha e alumínio (RODRIGUES, 2007).

Segundo Widmet (2005), os resíduos eletroeletrônicos podem conter em sua composição substâncias tóxicas, como chumbo, mercúrio, arsênio, cádmio, cromo hexavalete, retardantes de chamas bromados e halogenados, que geram dioxinas e furanos quando incinerados. São utilizados também metais preciosos como ouro, prata, platina, tálio, berílio e zinco.

O ouro e alguns metais preciosos tem ampla aplicação no processo de fabricação dos eletroeletrônicos. Servem principalmente como material de contato devido sua estabilidade química, propriedades condutoras e resistência à corrosão (CUI e ZHANG, 2008; FERNANDES, 2014).

Rodrigues (2007) destaca que as substâncias que causam maiores danos e são presentes nos resíduos eletroeletrônicos, do ponto de vista ambiental e saúde humana, são os metais pesados e os gases de efeito estufa, como os clorofluorcarbonetos (CFC) utilizado em aparelhos antigos de refrigeração, substâncias halogenadas, bifenilas policloradas (PCB), retardantes de chamas bromados e o arsênio.

O Quadro 1 mostra os materiais e componentes perigosos presentes nos resíduos eletroeletrônicos.

Quadro 1 - Materiais e componentes perigosos nos resíduos eletroeletrônicos.

<b>Materiais e componentes</b>	<b>Descrição</b>
Baterias	Metais como chumbo, mercúrio e cádmio podem estar presentes
Telas de tubos catódicos	Chumbo no cone de vidro e camada fluorescente que cobre o interior do painel de vidro
Interruptores	Possui mercúrio que é usado como termostato, sensores e transmissores de dados.
Cartuchos de tinta, líquida ou pastosa, assim como cartuchos coloridos	As tintas podem conter chumbo em sua composição
Placas de circuito impresso (PCI)	Possui cádmio e chumbo
Capacitores e plásticos com retardadores de chamas halogenados	Geram gases tóxicos ao serem incinerados

Fonte: RODRIGUES (2007)

Resíduo eletrônicos possuem várias substâncias que conferem perigos físico-químicos e efeitos toxicológicos, em vários níveis e formas, os quais são listados a seguir:

- Arsênio: utilizado na produção de semicondutores de gálio-arseniato e pilhas solares, pode causar descoloração da pele e aparência de verrugas.
- Cádmio: trabalhadores de fábricas de bateria e na fundição e refino de metais podem ser expostos ao cádmio. Os principais órgãos afetados são os pulmões, rins e irritações no aparelho digestivo;
- Chumbo: A exposição pode acontecer pela respiração de poeiras presentes em ambientes onde equipamentos são quebrados ou triturados e pela ingestão de alimentos e água contaminada. Pode causar danos ao sistema nervoso central e periférico;
- Mercúrio: Em níveis elevados, a exposição pode danificar o cérebro, rins e feto em formação. O metil mercúrio e os vapores metálicos podem alterar a visão, audição e memória. RODRIGUES (2007)

A contaminação de pessoas, animais e meio ambiente pode ser pelo contato direto, quando há a manipulação direta com os componentes perigosos dos eletroeletrônicos nos aterros. Pode ainda ocorrer de forma indireta ou acidental, visto que quando um produto é descartado junto ao resíduo sólido comum, há grandes chances de contaminação do solo, chegando ao lençol freático. Uma vez que a água está contaminada, pode afetar aos animais e ao homem.

Grande parte dos equipamentos eletroeletrônicos possui placa de circuito impresso (PCI) em seu interior. Para que essa tecnologia funcione, é necessário o uso de metais. Sendo assim, cada vez mais estudos estão sendo realizados, visando à recuperação de tais metais presentes nas PCI.

### **2.3. Placas de circuito impresso**

Placas de circuito impresso (PCI) são dispositivos que possuem a função básica de proporcionar suporte mecânico e interligação elétrica para os componentes utilizados no circuito eletrônico (SANTANA, 2011).

As PCIs são utilizadas em diversas áreas da indústria eletrônica, chegando a representar até 30 % da massa de todo o produto fabricado. Por ter composição

altamente heterogênea, sua reciclagem não é simples. Entretanto, a presença de metais e materiais perigosos ao meio ambiente em sua composição faz com que as PCIs sejam interessantes e necessárias para a reciclagem. Esses dispositivos de PCI são divididos em camadas condutoras (geralmente película de cobre) e isolantes (composta dos mais diversos materiais como polímeros, fibra de vidro, resinas celulósicas e resinas epóxi). Sua classificação se dá de acordo com a tipo de isolante usado na PCI. O chumbo é encontrado nas soldas das placas e causa sérios danos à saúde. Elementos como o cádmio e mercúrio, muito nocivos à saúde humana, também são encontrados em quantidades baixas nas placas. Além destes, as PCIs possuem retardantes de chama, a base de bromo, que são incorporados como forma de proteção contra a inflamabilidade. Essas substâncias são desreguladoras endócrinas e gases estufa (RIBEIRO, 2013).

De acordo com a pesquisa realizada por Gerbase e Oliveira (2012) a composição típica da sucata de placa de circuito impresso em porcentagem mássica pode ser definida conforme o Figura 2.

Componentes de uma PCI		Quantidades médias	
		Metais	Valores médios
Metais	28%	Cu	14%
		Fe	6%
		Ni	2%
		Zn	2%
		Sn	2%
		Ag	0,3%
		Au	0,04%
		Pd	0,02%
Plásticos		19%	
Bromo		4%	
Mat. cerâmicos, vidro e óxidos		49%	

Figura 2 - Composição média de uma PCI.

Fonte: GERBASE e OLIVEIRA 2012.

## **2.4. Carcaça polimérica dos equipamentos eletrônicos.**

A carcaça polimérica também pode ser reciclada, visto que em sua composição estão presentes polímeros termoplásticos. Entre eles estão, principalmente, os polímeros de ABS, Acrylonitrile Butadiene Styrene (Acrilonitrila-butadieno-estireno) e HIPS, High Impact Polystyrene (Poliestireno de alto impacto). Estes materiais também representam uma proporção significativa (30 % e 25 %) da fração de polímeros em equipamentos eletroeletrônicos dos mais variados tipos. O ABS é um dos termoplásticos de engenharia de grande importância e consiste de um polímero amorfo com boas propriedades mecânicas e elevada resistência ao impacto. Pelas mesmas razões, o ABS também é um interessante material polimérico para reciclagem. O HIPS tem uma estrutura semelhante com partículas de polibutadieno em uma matriz de poliestireno (GABRIEL, 2012).

A carcaça polimérica pode ser submetida a reciclagem mecânica, que consiste em separação do resíduo polimérico, moagem, lavagem, secagem, reprocessamento e transformação do grânulo em produto final (GABREIL, 2012).

## **2.5. Reciclagem**

Teixeira e Zanin (2001) definiram a reciclagem como:

“ 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. “

Segundo dados levantados pelo relatório Sustainable Innovation and Technology Transfer Industrial Sector Studies – Recycling from E-Waste to resources, em julho de 2009, da Organização das Nações Unidas (ONU), o Brasil é o país emergente que mais gera resíduo por habitante. Cada brasileiro produz meio quilo de resíduos por ano. A reciclagem do resíduo eletrônico poderia gerar empregos e desenvolvimento sustentável no país (UNEP, 2016).

Além do impacto ambiental causado pelos resíduos eletroeletrônicos, o não tratamento apropriado acarreta em uma perda econômica. A reciclagem dos resíduos é mais economicamente viável que extrair matéria prima da natureza e

processar para obter o produto final. O consumo energético para reciclar é menor e gera menos poluição do que atividades primárias.

De acordo com Ribeiro (2013), a reciclagem torna a obtenção do metal mais viável economicamente para o produtor, além de satisfazer certos objetivos sociais e ambientais. Tal fato corrobora com a conservação de fontes naturais e proteção do meio ambiente. Para isso a sociedade deve ser incentivada a participar da coleta seletiva de resíduos. Sendo assim, deve haver conscientização da população e o governo estabelecer regulamentos.

É preciso uma análise de custos e benefícios para indicar se a reciclagem de um resíduo é viável. O valor de venda do material recuperado deve ter condições de concorrer com o valor de mercado da matéria primária, ou ainda se os gastos com sua recuperação forem menores que os gastos com o transporte, tratamento e disposição (FERNANDES, 2014).

Hayes (1993) afirma que a reciclagem de materiais metálicos é importante, pois pode representar um ganho econômico. O Quadro 2 mostra que no processo primário de produção de metais, o metal é obtido através da redução do minério com elevado consumo de energia. No processo secundário o metal é obtido basicamente da fusão da sucata, já em estado metálico, e o consumo de energia é muito menor.

Quadro 2 - Consumo de Energia na produção Primária e Secundária de Metais (GJ/t. de metal).

<b>METAL</b>	<b>Produção Primária (GJ/t. de metal)</b>	<b>Produção Secundária (GJ/t. de metal)</b>	<b>Economia (%)</b>
<b>Alumínio</b>	253	13	95
<b>Níquel</b>	150	16	89
<b>Cobre</b>	116	19	83
<b>Zinco</b>	68	19	72
<b>Aço</b>	33	14	57
<b>Chumbo</b>	28	10	64

FONTE: HAYES, 1993

## 2.6. Legislação Ambiental Brasileira

A legislação referente à disposição de resíduos sólidos e resíduo eletrônico não é única para todos os países. Muitos deles não possuem nenhuma regulamentação ou legislação para a coleta e descarte desses materiais.

Nos últimos anos, houve um acréscimo no número de políticas ambientais e até leis que determinam o processo de desenvolvimento e gestão de produtos, visando reduzir os impactos ambientais causados pelo descarte inapropriado.

Mesmo com o consumo exagerado e em ritmo de crescimento de eletrônicos, o Brasil não possuía nenhuma política nacional de descarte de resíduo eletrônico até 2010 nem de responsabilidade sobre esse resíduo, mas apenas projetos regionais.

Em 2010, a Lei nº 12.305 instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, disciplinou a gestão e o gerenciamento dos resíduos sólidos no País, sendo o sistema de logística reversa o principal destaque. A logística reversa é um dos instrumentos para aplicação da responsabilidade compartilhado pelo ciclo de vida dos produtos. Também criou o Comitê Orientador para a Implementação de Sistemas de Logística Reversa, coordenado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) e integrado também pelos Ministérios da Saúde, do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (Mdic), da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa) e da Fazenda.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) define a logística reversa como um instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada (MMA, 2016).

Cinco grupos temáticos de discussão para o descarte de resíduos integram o comitê: remédios, embalagens, óleos e lubrificantes, lâmpadas e eletroeletrônicos. A cadeia produtiva de produtos e equipamentos eletroeletrônicos, que é coordenada pelo Mdic, é composta por:

- Linha Marrom - televisor tubo/monitor, televisor plasma/LCD/monitor, produtos de áudio;
- Linha Verde - desktops, notebooks, impressoras, aparelhos celulares;
- Linha Branca - geladeiras, refrigeradores e congeladores, fogões, lava-roupas, ar-condicionado; e

- Linha Azul – batedeiras, liquidificadores, ferros elétricos e furadeiras.

A Lei 12.305 ainda estabelece a responsabilidade por parte dos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes dos eletroeletrônicos a estruturar e implementar sistemas de logística reversa, mediante retorno dos produtos após o uso pelo consumidor (MMA, 2016).

Ainda assim, alguns estados como São Paulo, Paraná e Mato Grosso possuem leis específicas para a regulamentação do resíduo eletroeletrônico. Isto porque os estados do Brasil têm liberdade de deliberar leis, para preencher demandas regionais.

No Distrito Federal, por exemplo, ainda não há um projeto de coleta seletiva voltada para este tipo de material. Existem apenas a captação do resíduo eletrônico, realizada por duas empresas particulares e uma outra não-governamental na região do Entorno que trabalham em parceria com o Serviço de Limpeza Urbana. Tais empresas dependem da colaboração da população e contam com 13 Pontos de Entrega Voluntária (PEV). A Zero Impacto é uma das empresas responsáveis pela captação desse material no DF e chega a recolher mensalmente 2 toneladas de resíduo eletrônico de 9 PEV (CORREIO BRAZILIENSE, 2013).

Pode-se inferir que os resíduos que não são captados por essas empresas são dispostos no lixão da cidade Estrutural ou ainda em lixões clandestinos, visto que não há aterro sanitário no Distrito Federal. As obras do primeiro aterro sanitário do Distrito Federal já foram iniciadas e é localizado na região administrativa de Samambaia.

Internacionalmente, três principais iniciativas tentaram resolver o problema dos resíduos eletroeletrônicos. A Convenção da Basileia em março de 1989 foi concluída na Suíça e tratava sobre o Controle de Transfronteiriços de Resíduos Perigosos e seu Depósito e procura coibir o tráfico ilegal, prevendo a intensificação da cooperação internacional para a gestão ambientalmente adequada desses resíduos. A Conferência de Estocolmo que determina que os Países-Parte adotem medidas de controle relacionadas a todas as etapas do ciclo de vida - produção, importação, exportação, uso e destinação final – dos poluentes orgânicos persistentes (POP) listados em seus Anexos. Por fim, a Conferência de Roterdã objetiva o controle do movimento transfronteiriço de produtos químicos perigosos, baseado no princípio do consentimento prévio do país importador e na

responsabilidade compartilhada no comércio internacional desses produtos (MMA, 2016).

O tráfico ilícito ou tráfico ilegal, segundo a convenção da Basiléia, compreende o transporte entre estados ou países sem o consentimento, notificação ou em conformidade de ambas as partes envolvidas na remoção e gerenciamento do resíduo perigoso. O Brasil proibiu a importação de resíduos perigosos e rejeitos pela PNRS da lei 12.305,

De acordo com Ribeiro (2007), em 2002, um relatório “Exporting Harm” publicado pela rede de ação da Basiléia e pela Silicon Valley Toxics, denunciou que aproximadamente 50 – 80 % do resíduo de equipamentos de informática coletados para reciclagem no oeste dos Estados Unidos eram enviados para países em desenvolvimento. A parcela processada nacionalmente, grande parte era realizada através de trabalho prisional.

Puckett et al (2005) relata que, após publicações do relatório “Exporting Harm” com denúncias sobre exportação de resíduo eletrônico para a China e Índia, os exportadores de resíduos tiveram que encontrar novas destinações para tais, além de boas justificativas para dar continuidade à transferência de resíduos. Novas investigações do Basel Action Network (BAN), indicaram que o novo fluxo desses resíduos está seguindo para Malásia, Cingapura, Filipinas, Vietnã e África e que a justificativa encontrada é saldar a “dívida digital” dos países desenvolvidos com os países pobres, através da doação de equipamentos destinados a conserto e reuso.

## **2.7. Tratamentos dos Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos**

Segundo Yamani (2012), as opções de tratamento dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos geralmente envolvem o reuso, remanufatura ou remodelamento, reciclagem, além das formas usuais de tratamento e disposição final dos resíduos sólidos (como a incineração e aterros). A remanufatura envolve a desmontagem, limpeza, reparo e modelamento, remontagem e teste para a produção de equipamentos novos e seminovos, e o uso de peças antigas e reposição de peças novas.

Uma das formas de tratamento mais adequada é o reuso, ou seja, o não descarte de equipamentos que não apresentam defeitos irreparáveis, aumenta a

vida útil do aparelho e faz com que o volume de resíduo para tratamento seja reduzido (FERNANDES, 2014).

A incineração de resíduos eletroeletrônicos gera emissões e resíduos. Os metais pesados ficam acumulados nas cinzas e fumaça. Como há uma variedade de substâncias nos resíduos, efeitos nocivos específicos durante a incineração são verificados (RODRIGUES, 2007). O cobre funciona como catalisador, aumentando o risco de formação de dioxinas quando os plásticos com retardantes de chama são incinerados (CCE, 2000).

A reciclagem faz o reprocessamento do resíduo para a produção de materiais. É viável para a recuperação de metais preciosos e de significativo valor de mercado. Esse processo baseia-se na desmontagem para separação seletiva e caracterização dos componentes do eletroeletrônico, no beneficiamento utilizando processos mecânicos e metalúrgicos para concentrar materiais e o refino que recuperará os materiais.

Em seguida será abordado os cinco principais processos utilizados para o beneficiamento e refino desses resíduos que são os processos mecânicos, eletrometalúrgicos, pirometalúrgicos e hidrometalúrgico. Neste trabalho, será dado enfoque maior nos processos mecânicos, para recuperação de ferro e níquel.

### **2.7.1. Processamento mecânico**

Esse processamento tem por principais finalidades reduzir o volume, concentrar e separar as frações de materiais desejados. As etapas de cominuição, classificação e separação são baseadas em propriedades físicas do material. Sendo assim, após o processamento mecânico é possível a obtenção de frações concentradas de polímeros, óxidos refratários e metais.

Fernandes (2014) descreveu algumas das etapas desse processamento:

- **Cominuição:** Também conhecida como moagem, tem como princípio o uso de força bruta para fragmentar o resíduo pelo movimento dentro de um moinho adequado, sendo os mais utilizados os moinhos de facas e o de martelos. O mecanismo utilizado pode ser pressão, impacto, abrasão ou corte. Pode ser usado a fragilização criogênica, que se baseia no congelamento a temperaturas muito baixas com nitrogênio líquido, aumentando a eficiência do moinho. A Figura 3 mostra o esquema de um moinho de facas, comumente

utilizado para cominuição de placas de circuito impresso e polímeros. O material é alimentado na parte superior do equipamento e, ao entrar em contato com as facas, é moído.

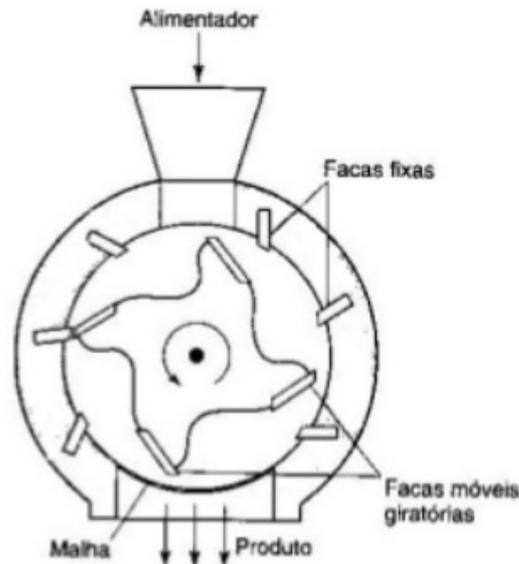


Figura 3 - Moinho de facas.

FONTE: UFRGS, 206

- Classificação granulométrica: Após a moagem, o material será classificado por meio de peneiras, que tem a superfície vazada e permitem a passagem de partículas menores que a abertura, retendo as partículas maiores. Veit (2005) estudou o uso do processamento mecânico e concluiu que a faixa granulométrica que compreende maior teor de metais encontra-se na faixa maior que 1,0 mm.
- Separação gravimétrica: Baseada na diferença de densidade que os materiais possuem, utiliza líquidos densos e líquidos suspensos de densidade intermediária.
- Separação magnética: Baseia-se no movimento diferencial de materiais em campo magnético. Aqueles que são repelidos pelo campo magnético são classificados como diamagnéticos e são movidos para a posição de mais baixa intensidade de campo. Os materiais atraídos são os paramagnéticos que se deslocam para a posição de maior intensidade do 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, 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 de metais a partir do processamento mecânico, outro processo é necessário para obter separadamente os metais desejados, tais como ferro, níquel, chumbo, cobre, ouro e prata. A seguir serão explicados alguns desses processos de refino.

### **2.7.2. Eletrometalurgia**

A eletrometalurgia é uma parte do refinamento para a recuperação de metais puros. Tais processos eletroquímicos são comumente efetuados em eletrólitos aquosos ou sais fundidos.

Segundo Veit (2005), existem duas técnicas muito utilizadas para remoção de metais, a eletro-obtenção quando possui um eletrólito contendo o íon metálico de interesse e o eletro-refino quando utiliza anodo “impuro” contendo o íon metálico de interesse além de outros componentes.

As vantagens desse processamento são os seguintes:

- Poucas etapas de execução, os concentrados de metais preciosos obtidos representam de 95 a 97 % dos metais presentes nos resíduos;
- A presença de metais preciosos nas lamas anódicas após refino e eletrólise é muito baixa;
- Utilizando a eletrólise os metais base ficam inalterados;
- O tempo de vida do eletrólito é longo, evitando frequentes regenerações;
- O produto obtido é praticamente livre de impurezas. (VEIT, 2005)

### **2.7.3. Pirometalurgia**

Em geral, a pirometalurgia para recuperação de metais a partir de resíduos eletroeletrônicos se procede com a redução direta dos óxidos metálicos a temperaturas acima de 1000° C. Nesse processo há geração de gases, e esses deveram receber tratamento posterior, devido sua toxicidade. A escória também é um subproduto desse método (MORAES, 2011).

Os processos pirometalúrgico 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 resíduo eletroeletrônico no final do século passado (VEIT, 2005).

As vantagens desse processamento é que não requer um pré-tratamento e exige poucas etapas, além de aceitar qualquer tipo de sucata eletrônica. O processo pirometalúrgico pode ainda ser combinado com aplicação posterior de técnicas hidrometalúrgicas (VEIT, 2005).

Embora os processos pirometalúrgicos sejam comprovadamente bem sucedidos, a pirometalurgia apresenta alguns problemas, como a formação de dioxinas e furanos no tratamento térmico, perdas de metais por volatilização de cloretos, aumentando a quantidade de escória nos fornos que leva a perda de metais nobres e de base e tem a recuperação de alumínio e zinco muito dificultada. (RIBEIRO, 2013)

#### **2.7.4. Hidrometalurgia**

Segundo Santana (2011), quando aplicada exclusivamente às placas de circuito impresso e seus metais, o processo hidrometalúrgico consiste em uma série de ataques ácidos ou cáusticos, que de solubilizará o material sólido. Esse método utiliza uma gama de reagentes.

Após os ataques no processamento hidrometalúrgico, as soluções são submetidas à procedimentos de separação como extração por solventes, precipitação, cementação, troca iônica, filtração e destilação para isolar e concentrar o metal de interesse (VEIT, 2005).

Esse processamento diminui o impacto ambiental e possui menor custo. Porém, ele tem restrição a resíduos eletrônicos mais complexos, faz-se necessária a redução de volume previamente, o ataque químico só é efetivo se o metal estiver exposto e demanda grandes volumes de soluções, além de produzir efluente contendo elementos corrosivos e/ou tóxicos (FERNANDES, 2014).

De acordo com Fernandes (2014), a hidrometalurgia demonstrou maior eficiência na recuperação de metais de resíduos eletroeletrônicos, quando

antecedida por processos mecânicos. Esse método também apresenta desempenho ambiental e econômico satisfatório.

## **2.8. Tratamento da carcaça polimérica**

A reciclagem de polímeros pode ser classificada por meio de quatro categorias distintas: primária, secundária, terciária e quaternária. Por sua vez, essas categorias são agrupadas em três processos de reciclagem: mecânica, química e energética (GABRIEL, 2012).

### **2.8.1. Reciclagem mecânica**

Tanto a reciclagem primária quanto a secundária são conhecidas como reciclagem mecânica ou física, que consiste na transformação física de resíduos poliméricos em grânulos. A diferença é que a primária utiliza resíduos industriais e a secundária, resíduos pós consumo e sobras de polímero industrial. (GABRIEL, 2012)

As etapas da reciclagem mecânica são: separação do resíduo polimérico, moagem, lavagem, secagem, reprocessamento e transformação do grânulo em produto final. Porém, é necessário que seja feita a coleta, a separação por tipo de polímero e a retirada de rótulos, de grampos e de outras impurezas, antes de realizar a reciclagem propriamente dita. A viabilização da reciclagem mecânica pode ser feita por meio de reprocessamento por extrusão, injeção e moldagem por compressão. Quando o reprocessamento é feito por extrusão, ele é composto por aglutinação (no caso de polímeros flexíveis), extrusão propriamente dita e granulação (GABRIEL, 2012).

No presente trabalho, será retratada a reciclagem mecânica, apenas.

### **2.8.2. Reciclagem química**

Também conhecida como reciclagem terciária, não é muito utilizada no Brasil, devido ao custo elevado.

A reciclagem química ocorre através de processos de despolimerização por solvólise (hidrólise, alcoólise, amilose), por métodos térmicos (pirólise à baixa e alta

temperaturas, gaseificação, hidrogenação) ou ainda métodos térmicos/catalíticos (pirólise e a utilização de catalisadores seletivos) (SPINACE e PAOLI, 2005).

### **2.8.3. Reciclagem energética**

A reciclagem quaternária é baseada na recuperação de energia térmica nos resíduos poliméricos. Isso é possível, pois muitos polímeros são excelentes combustíveis e possuem elevado poder calorífico, liberando grande quantidade de calor, quando submetidos a elevadas temperaturas. Devido ao custo elevado das instalações, dos sistemas de controle de emissões e dos sistemas operacionais, além da exigência de mão de obra qualificada necessária para este tipo de reciclagem, ela ainda não foi implantada no Brasil. Porém, os países que adotam este tipo de modalidade, como Áustria e Suécia, conseguem reduzir o volume de seus resíduos em até 90 % (GABRIEL, 2012).

## **2.9. Equipamentos utilizados para o processamento**

### **2.9.1. Moinho de facas**

O moinho de facas foi escolhido para tal operação, tendo em vista que gera menos fino quando comparado com o moinho de martelos e pelo fato de já ter sido utilizado por Veit (2005) para cominuição de placas de circuito impresso, além de ser adequado também para material polimérico.

Um exemplo de moinho de facas comercial é o ultra-granulador tipo PANTHER, capaz reduzir o resíduo eletrônico para uma granulometria menor que 4 mm. O material é normalmente alimentado por meio de uma correia transportadora ou alimentador vibratório em toda a largura da máquina. As facas maciças funcionam com um intervalo de corte de tolerância muito próximo do intervalo de tempo das facas contrárias opostas. Na parte inferior, é instalada uma tela bem dimensionada, que prende o material cortado na câmara até ser obter granulometria menor ou igual a 4 mm e descarregada através dos orifícios da tela (PALLAMANN, 2016).

Os resultados da primeira cominuição apresentados no trabalho de Veit, (2005) indicam que a maior parte do material cominuído com metais se concentra nas frações entre 1 mm e 6 mm. Sendo assim, 4 mm seria uma granulometria

adequada para a concentração de metais.

Os materiais são de fácil separação porque, segundo Zhang e Forsberg (1999) é fácil obter a liberação dos compostos presentes em sucatas eletrônicas devido a baixa ligação interfacial dos materiais usados em equipamentos eletrônicos. Basicamente os materiais são unidos por fixação, inserção, soldagem e empacotamento. Por isso a energia para liberar os materiais associados como cerâmicas, vidros e metais, tendo propriedades mecânicas distintas, não é muito intensa.

### **2.9.2. Separador magnético**

De acordo com Veit (2005), quando uma partícula suscetível a um campo magnético é colocada em um separador magnético, uma força magnética irá agir sobre esta partícula possibilitando a sua separação dos demais materiais restantes.

Em seu trabalho, Veit (2005) utilizou um separador magnético de correias cruzadas a seco, usando em média um campo magnético de 6000 a 6500 Gauss. A principal aplicação de um separador magnético a seco é remover partículas ferrosas e impurezas fortemente magnéticas ou então concentrar componentes valiosos que sejam fortemente magnéticos. No trabalho, o resultado obtido foi uma fração magnética (Fe, Ni, Cu e Pb) e uma não magnética (metais restantes, polímeros e cerâmicos). Para as amostras de PCI, em termos percentuais, o ferro é o principal elemento da fração retida, aproximadamente 50 %, seguido do níquel e do cobre. Os teores de chumbo foram insignificantes. A massa retida no separador magnético foi de 4 % do total submetida a essa operação.

Esses resultados já eram esperados, pois como se trata de uma separação magnética, o ferro e o níquel, que são materiais fortemente magnéticos, deveriam ser predominantes na fração retida. A presença de cobre ocorre devido a sua predominância na sucata de placas de circuito impresso, ou seja, como tem muito mais cobre que qualquer outro elemento metálico, o cobre é arrastado junto às partículas de ferro e níquel atraídas pelo magneto (VEIT, 2005).

O material não magnético era composto aproximadamente por 53 % de cobre, 9 % de chumbo e 20 % de estanho. Metais como alumínio e ouro também foram

detectados com concentrações em baixas.

Em seguida, tanto o material retido no separador magnético quanto o material não magnético serão destinados a um dos processos que serão explicados a seguir para a recuperação dos metais puros. Este trabalho consiste em promover a separação entre os materiais magnéticos e os não magnéticos que seguirão para outro processo de refino de metais.

### **2.9.3. Tanque de lavagem e descontaminação**

Após moído, a carcaça polimérica é colocada em um tanque, contendo água ou solução de detergente aquecido. O termo “lavagem” pode se referir tanto a retirada de impurezas como terra ou óleo como também a separação por diferença de densidade (ou descontaminação) de dois ou mais tipos de polímero que estão na condição de material moído ou granulado. Essa etapa se faz necessária para que o polímero siga sem impurezas, pois essas virão a alterar as propriedades dos polímeros (SPINACE e PAOLI, 2005).

### **2.9.4. Secador de polímeros**

A secagem do material é importante, pois alguns polímeros podem sofrer hidrólise durante o reprocessamento. O resíduo de detergente e água pode agir como catalisador na hidrólise. A secagem pode ser feita por processo mecânico e/ou térmico, por meio de secadores (SPINACE e PAOLI, 2005).

Primeiramente, o material polimérico será colocado em um secador rotativo. Esse secador possui uma roca e é utilizado para retirar a água inicial da massa polimérica. O material fica retido em uma peneira e a água sai pela tela em função do movimento centrífugo da massa.

Em seguida, o material é transferido para um silo secador. O ar é aquecido por resistência na parte inferior do equipamento, passa pelo material polimérico retirando o resquício de água e sai na parte superior do silo.

Uma vez que o material polimérico se encontra seco, seguirá para extrusão.

### 2.9.5. Extrusora

Extrusoras de polímeros são equipamentos cuja finalidade é a conformação de polímeros em formatos desejados, de acordo com a matriz aplicada. O processo se dá através do aquecimento (por resistências elétricas) do material até próximo da temperatura do seu ponto de fusão, que é então forçado, através de uma rosca helicoidal, para a matriz (WEG, 2016).

Ao passar pelo cabeçote, que contém a matriz, o polímero adquire a forma desejada. Em seguida, será resfriado em um tanque com água, localizado logo abaixo do cabeçote e cortado por um granulador. Uma forma comum de se obter tais polímeros são grânulos, também chamados de pellets. A Figura 4 mostra o esquema de funcionamento de uma extrusora.

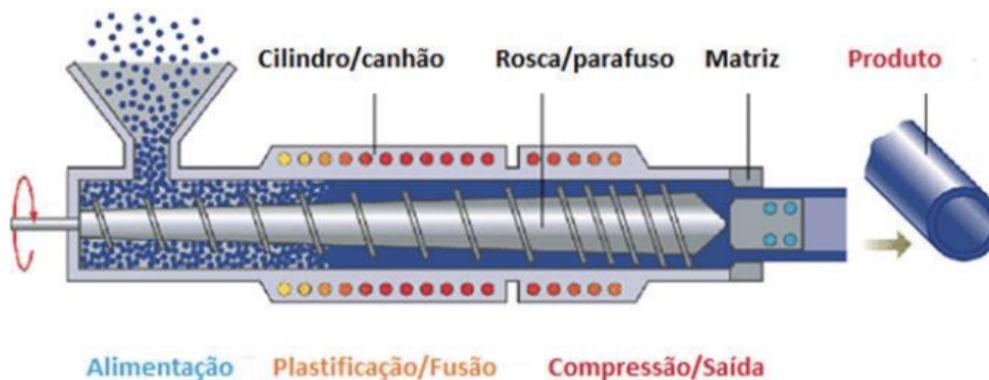


Figura 4 - Princípio de funcionamento de uma extrusora

FONTE: ABIPLAST, 2016.

A Figura 5 exemplifica o processo de granulação de polímeros. Os fios de polímero que saem a partir de um cabeçote de matriz (01) passam através do tanque de resfriamento (02). A lâmina de ar (03) garante uma secagem efetiva dos fios antes do corte. As ferramentas de alimentação do granulador (04) prendem os “espaguetes” de polímero e dirigem-nas para as ferramentas de corte (05) onde os fios são cortados em pellets pela ação do rotor contra a faca. As pastilhas são classificadas, resfriadas e transportadas em operações subsequentes. A água de resfriamento é filtrada e (06) e depois retornada para o tanque.

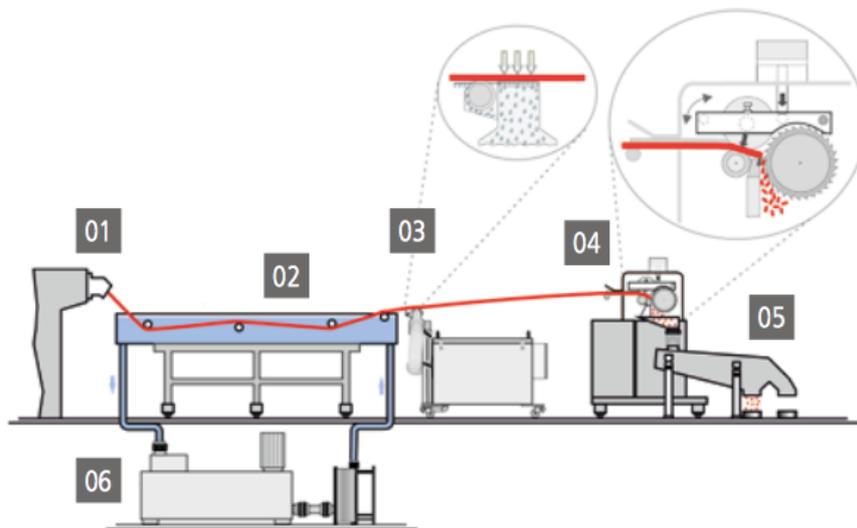


Figura 5 - Esquema de funcionamento de um granulador

FONTE: PSG, 2016.

### **3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA**

Tendo como base a referencia bibliográfica e seus levantamentos técnicos das características do resíduo de eletroeletrônicos e suas estimativas de geração, foi realizada uma pesquisa sobre os equipamentos disponíveis comercialmente para a cominuição do resíduo, para a classificação granulométrica, assim como para a separação magnética.

Para isso, foram levantados estudos sobre metalurgia, dando enfoque para o tratamento e extração de metais provenientes de resíduo eletroeletrônico utilizado em publicações de diversos anos e nacionalidades, visando uma alternativa para recuperar tais resíduos.

Por fim, foi realizado um estudo para obter um sistema para a recuperação de material magnético e não magnético presente em placas de circuito impresso, assim como a recuperação de polímeros.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1. Sistema de recuperação de material materiais magnéticos e não magnéticos partir da reciclagem de placas de circuito impresso.**

A partir das informações adquiridas na literatura, foi proposto um sistema de recuperação do material contendo ferro e níquel presentes nas placas de circuito impresso, bem como a cominuição da carcaça polimérica. Foi estabelecida uma capacidade de processamento de  $1000 \text{ kg.h}^{-1}$ , ou seja, 8000 quilogramas de placas de circuito impresso por dia

#### **4.1.1. Pré-processamento**

O passo inicial para o processamento de placas de circuito impresso é a desmontagem dos aparelhos eletrônicos. Essa etapa tem como objetivo separar as carcaças compostas majoritariamente por polímeros dos materiais cerâmicos, metálicos e das baterias. Essa separação é manual e o operador separara as placas de circuito impresso e as carcaças poliméricas no galpão de triagem para direcioná-las ao processamento mecânico adequado.

Os materiais tóxicos presentes nos equipamentos eletrônicos tornam o processo de reciclagem no mínimo desaconselhável para leigos e no pior caso exigindo inclusive disposição especial em áreas preparadas para recebê-los, a fim de evitar graves contaminações, no meio ambiente. Sendo assim, os componentes elétricos que não forem ser processados, tais como baterias e capacitores devem ser enviados para aterros industriais especiais para resíduos perigosos (KIRNER, et al. 2004).

A Figura 6 mostra um fluxograma que exemplifica um esquema do processo utilizado por Veit (2005).

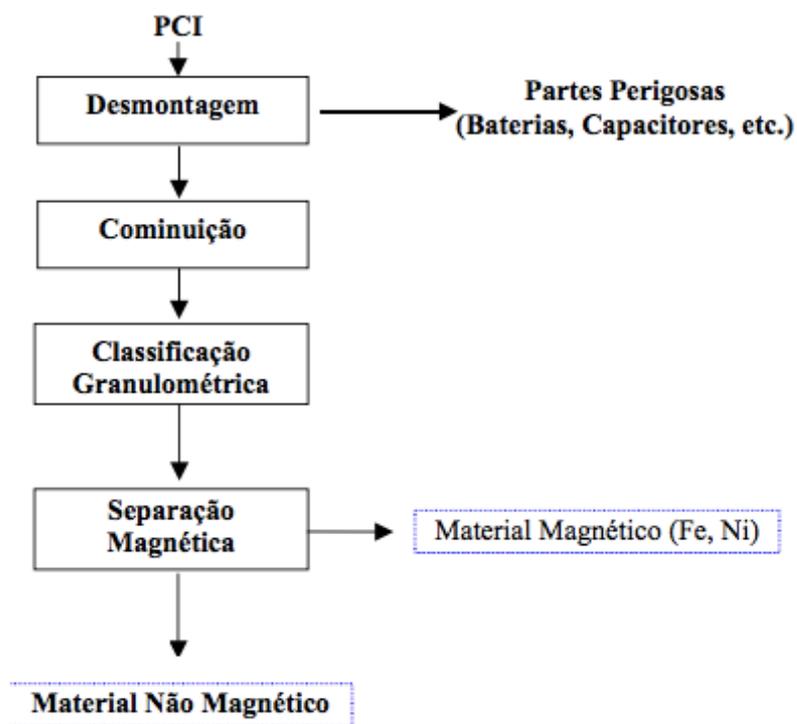


Figura 6 - Fluxograma das etapas do processo.

FONTE: VEIT, 2005.

#### 4.1.2. Processamento mecânico

Após o pré-processamento, as placas de circuito impresso são submetidas a um processamento mecânico para redução do tamanho de partículas e classificação.

##### 4.1.2.1. Moagem e classificação granulométrica

Conforme Veit (2005), a granulometria do material que apresenta maior concentração de metal é entre que 1 mm e 6 mm. Sendo assim, um moinho interessante para tal processamento é o Moinho de facas ultra-granulador tipo PANTHER. As placas de circuito impresso são colocadas no moinho e quando atingem diâmetro menor ou igual a 4 mm, as partículas passam pela tela presente no equipamento.

As Figuras 7 e 8 mostram o moinho de facas ultra-granulador tipo PANTHER, que possui potência de motor de 160 kW, bocal de 810mm x 1280mm, rotor FS8

com diâmetro de 800 mm, com produção de 1500 kg.h<sup>-1</sup> e tela para partículas de 4 mm.

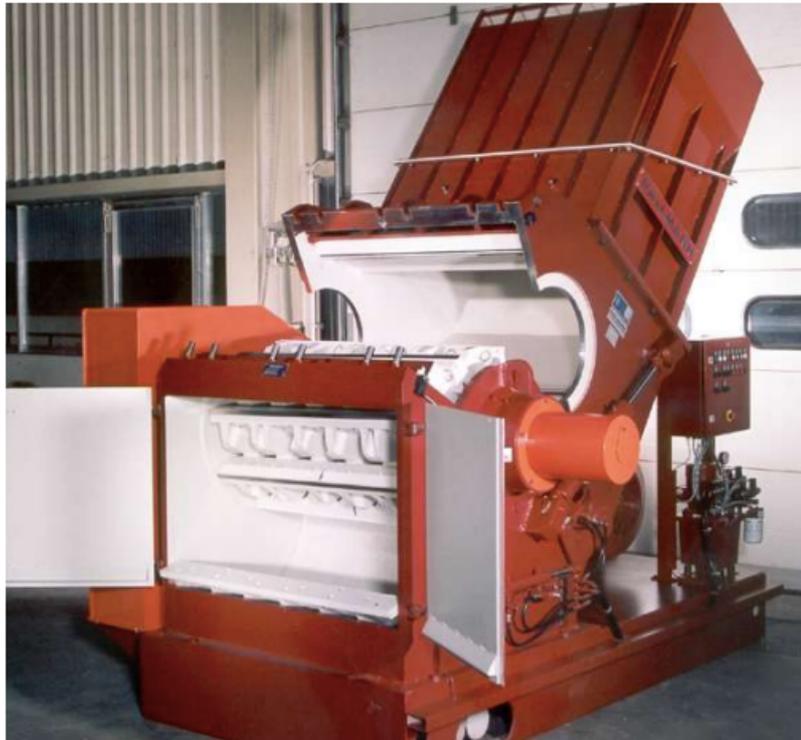


Figura 7 - Moinho de facas ultra-granulador tipo PANTHER.

FONTE: PALLAMANN, 2016.

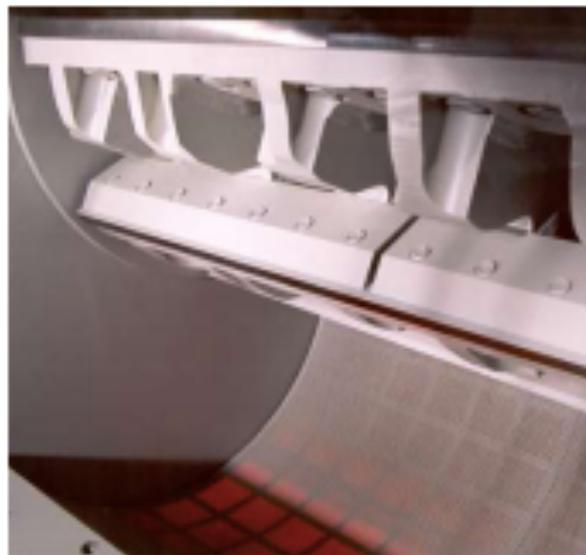


Figura 8 - Vista interna do Moinho de facas ultra-granulador tipo PANTHER .

Fonte: PALLAMANN, 2016.

O material com tamanho menor ou igual à 4 mm é então conduzido a um separador magnético por meio de uma esteira.

#### 4.1.2.2. Separação Magnética

O material triturado pelo moinho e com diâmetro menor ou igual a 4 mm é coletado em um recipiente e conduzido a uma esteira. Então é alimentado no separador magnético com uma grade de segurança, com abertura de 1 cm para evitar queda de materiais estranhos ao processo.

Um exemplo de separador magnético comercial é o KDS-1200B da marca Kanetec. Possui potência de 0,75 kW, com tambor de 500 mm de diâmetro, densidade de fluxo magnético de 100 mT (mili Tesla) e capacidade de alimentação de 125 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>. A Figura 9 mostra o modelo comercial desse separador e a Figura 10 exemplifica o princípio de funcionamento do ímã permanente presente no tambor rotativo.



Figura 9 - Separador magnético KDS- 12000

FONTE: KANETEC, 2016.

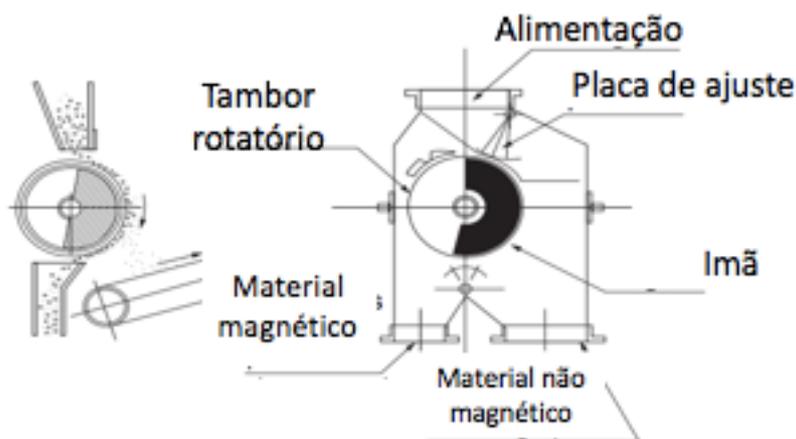


Figura 10 - Funcionamento do tambor rotatório do separador magnético

FONTE: KANETEC, 2016.

Como o ilustrado na Figura 10, o material magnético é atraído para o ímã permanente presente no tambor rotatório e será direcionado para uma abertura específica e, em seguida, despejado em bombona. O material não magnético não sofrerá atração pelo ímã, e será armazenado em bombonas.

O material recuperado, tanto o magnético quanto o não magnético, pode ser vendido para empresas que se interessam por sucatas ferrosas e não ferrosas e são responsáveis pelo refino dos metais de interesse. Essa negociação se dá principalmente para os países asiáticos. As principais empresas internacionais que estão inseridas no comércio internacional de sucatas são: Indicaa, Everest, Tata Steel e Global Steel (INESFA, 2014).

#### **4.2. Sistema de reciclagem da carcaça polimérica.**

Tendo como base informações adquiridas na literatura, foi proposto um sistema de reciclagem do material polimérico presentes nas carcaças dos equipamentos eletroeletrônicos.

Foi estabelecido que, quando a triagem separar 400 kg de material de um determinado polímero, essa porção será submetida às seguintes etapas de processamento. A Figura 11 exemplifica de forma simplificada as principais etapas da reciclagem.

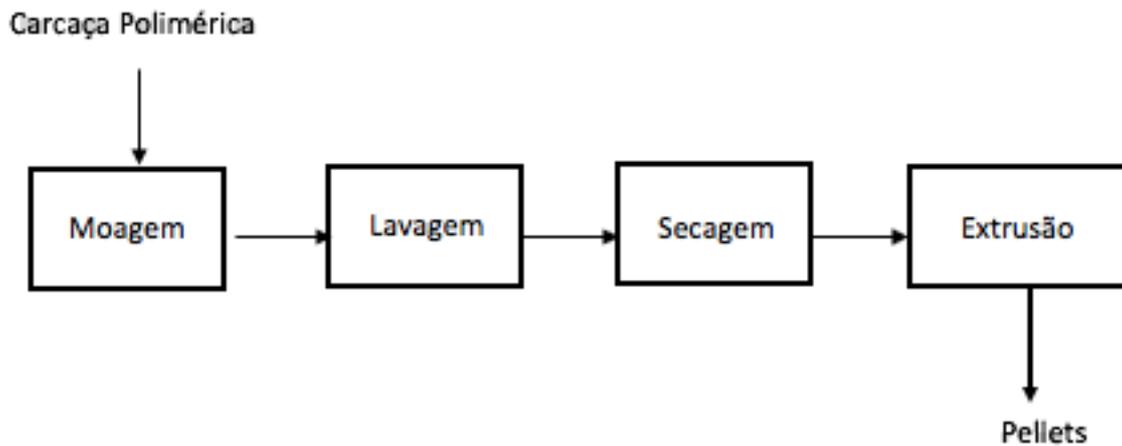


Figura 11 - Fluxograma de sistema de reciclagem da carcaça polimérica

O material será primeiramente moído, seguindo para a lavagem, secagem, reprocessamento e transformação do grânulo em produto final.

Os polímeros devem ser processados e armazenados separadamente no galpão de triagem. Quando for obtido 3200 kg de um determinado polímero, essa porção seguirá para o processamento. Após a produção dos pellets, esses grânulos seguirão para indústrias que reciclam polímeros. A indústria brasileira, Comercial Alassia, é responsável pela recuperação de polímeros e metais, podendo ser uma alternativa nacional para a venda de tal produto.

#### 4.2.1. Cominuição da carcaça polimérica

Para a cominuição desse material, um moinho de faca do mesmo modelo utilizado para triturar as placas de circuito impresso pode ser utilizado, porém com capacidade reduzida. O moinho de facas ultra-granulador tipo PANTHER 630 x 800 com potência de 110 kW se encaixaria na alimentação de 400 kg.h<sup>-1</sup>. O processamento de carcaças poliméricas foi menor do que os de placas de circuito impresso, visto que a quantidade de polímeros recuperada é menor, baseando-se no fato de que equipamentos eletroeletrônicos podem ser fabricados com uma maior variação de polímeros.

#### 4.2.2. Lavagem e Descontaminação

Nessa etapa, o polímero triturado deve ser submetido a um tanque próprio para lavagem e descontaminação. Um exemplo comercial desse equipamento é o Tanque de Lavagem e Descontaminação da marca Gold Press. Dispõe de palhetas para movimentação dos materiais, tracionadas por moto redutor de 0,5 CV, acelerando a lavagem dos mesmos. Possui entrada de água controlável por válvulas de esfera. Com roda sacadora sobre o tanque, tracionada por moto redutor de 2 CV para retirada dos materiais, através de 6 canecas. Conforme o fabricante Gold Press, permite que sejam lavados  $400 \text{ kg.h}^{-1}$  de polímeros nesse equipamento. O material que tiver densidade maior que a da água será recuperado no fundo do tanque, ou ainda pode ser adicionado sal no tanque para aumentar a densidade da água e permitir que os polímeros mais densos, como HIPS e ABS, flutuem e permita a retirada através das canecas.

O polímero deve ser alimentado do lado oposto onde se encontram as canecas para a retirada do menos densos que a água, como os polietilenos. As palhetas forçaram o material a chegar do outro lado do tanque.

A Figura 12 retrata esse tanque usado para lavagem e descontaminação de polímeros.

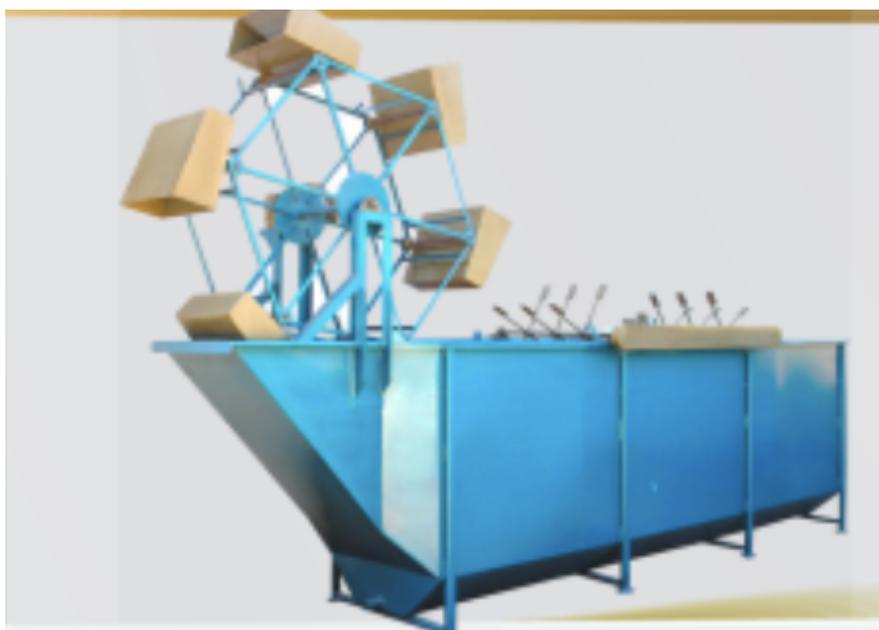


Figura 12 - Tanque de Lavagem e Descontaminação da marca Gold Press.

FONTE: GOLDPRESS, 2016.

A água utilizada nessa etapa deve receber o tratamento adequado, podendo ser reutilizada nas próximas operações do equipamento.

#### **4.2.3. Secagem dos polímeros**

Após a lavagem e descontaminação, o material deverá ser secado. A Secadora oblíqua da marca Gold Press, conforme a Figura 13, é um exemplo comercial para essa finalidade. Ela é rotativa e inclinada a 30°, com dois metros de comprimento e 0,50 m de diâmetro, acionada por motor de 15 CV. Possui capacidade de 400 quilos de plásticos por hora e retira a grande parte da água. Há em seu interior 32 paletas que auxiliam o movimento da massa.



Figura 13 - Secadora oblíqua da marca Gold Press.

FONTE: GOLDPRESS, 2016.

Em seguida, o material seguirá para um silo secador mostrado na Figura 14, de modelo NZ SG-400, marca NZ Philpolymer, a fim de finalizar a secagem completa do material antes de ser alimentado na extrusora. Este equipamento tem um volume que permite secar 400 kg de material, com uma potência de aquecimento de 18 kW, potência do soprador de 750 W, diâmetro de 900 mm e altura de 1800 mm. O ar aquecido por resistência na parte inferior do silo passa pelo material polimérico e sai pela parte de cima.



Figura 14 - Silo secador NZ SG-400 da marca NZ Philipolymer.

FONTE: NZ PHILIPOLYMER, 2016

#### 4.2.4. Extrusão

Ao se obter o polímero seco, o mesmo será submetido a extrusão. Como cada polímero possui um ponto de fusão, a extrusora deverá ter controle de temperatura, além de ter uma rotação apropriada para cada tipo de polímero. Um modelo comercialmente disponível é a extrusora para plásticos, da marca Lessa máquinas. Ela possui capacidade de alimentação de  $400 \text{ kg.h}^{-1}$ , com motor de 70 kW e produz pellets de 120 mm de diâmetro. A Figura 15 exemplifica tal equipamento.

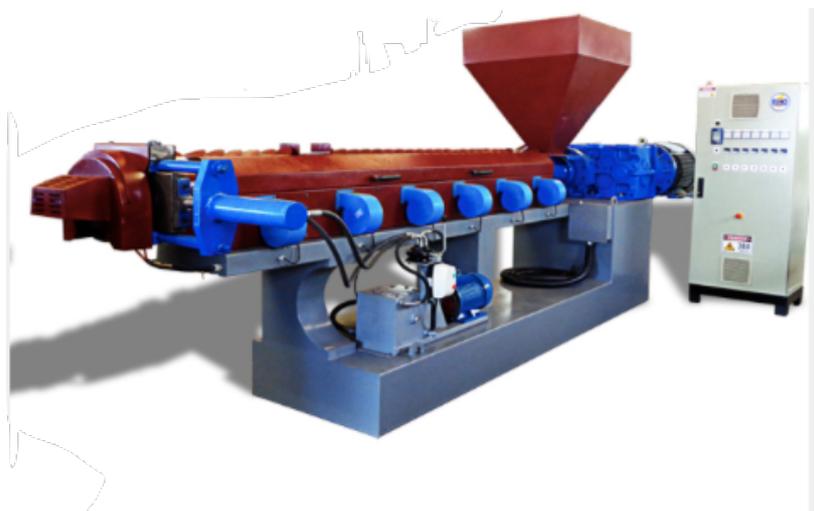


Figura 15 - Extrusora para plásticos, marca Lessa máquinas

FONTE: LESSA MÁQUINAS

A extrusora funde e torna a massa polimérica homogênea. O ponto de fusão do ABS é aproximadamente de 175°C e o do HIPS é aproximadamente 230°C, de acordo com Souza e Borges (2011). Na saída da extrusora, encontra-se o cabeçote, do qual sai um "espaguete" contínuo, que é resfriado em um tanque, contendo água. A Figura 16 retrata como é feito o resfriamento do "espaguete".



Figura 16 - resfriamento do "espaguete" produzido na extrusora.

FONTE: SHICHENGSJ, 2016

Em seguida, o "espaguete" produzido na extrusora é cortado em um granulador e transformando em pellet (grãos plásticos). A Figura 17 mostra um granulador comercial disponível, modelo Primo 200 E, da marca Automatik, com capacidade de 400 kg.h<sup>-1</sup> de polímero e 11 kW de potência. Este possui rotor de corte com 30 dentes, possibilitando a produção de pellets de 5 mm. A Figura 18 mostra o secador com lâmina de ar e a Figura 19 o rotor utilizado para o corte dos pellets.

O secador possui um tubo de sucção com alta capacidade, que produz vácuo e força a entrada de ar. É colocado logo após o tanque de resfriamento, como mostra a Figura 20. Os pellets são cortados pela ação do rotor contra uma faca no interior do granulador.



Figura 17 - Granulador Primo 200 E, da marca Automatik

FONTE: PSG, 2016.



Figura 18 - Secador SE 4000-2 air knife

FONTE: PSG, 2016.



Figura 19 - Rotor com 30 dentes para a produção de pellets.

FONTE: PSG, 2016.

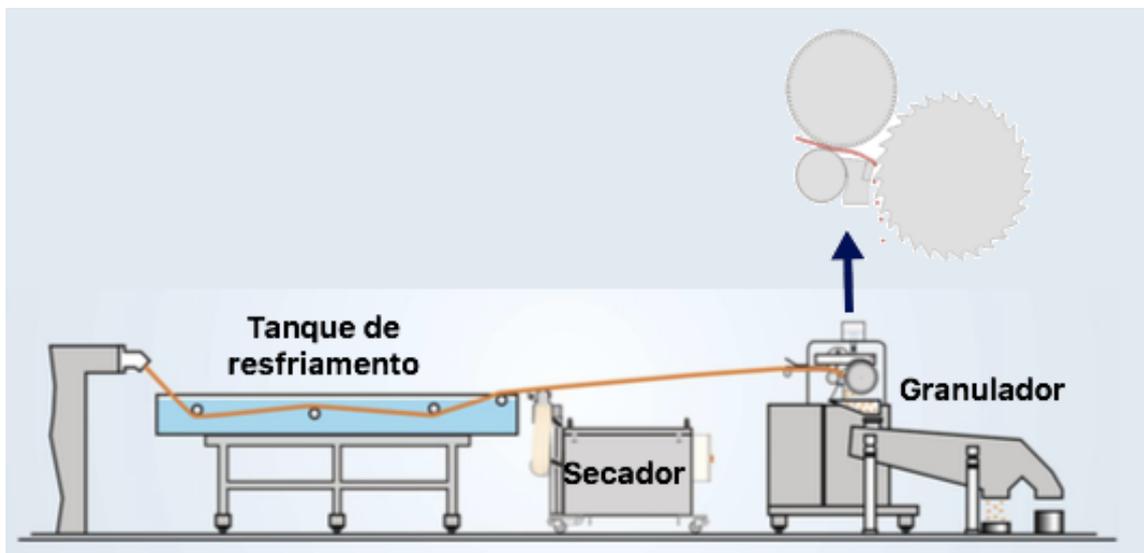


Figura 20 - Esquema de funcionamento da granulação

FONTE: ADAPTADO DE PSG, 2016.

## 5. CONCLUSÃO

Para diminuir o volume de resíduos eletroeletrônicos descartados de maneira inadequada, deve-se primeiramente conscientizar população sobre os riscos que essa conduta acarreta. Com uma destinação adequada, além de minimizar os impactos causados ao meio ambiente, há uma otimização na recuperação dos componentes que ainda possuem valor agregado.

Concluiu-se que é possível montar um sistema de recuperação de material magnéticos, não magnéticos e polímeros de resíduo eletrônico com equipamentos comerciais disponíveis.

Um dos principais pontos sobre a viabilidade da reciclagem de resíduos de eletroeletrônicos é reconhecer que diversas técnicas devem ser combinadas e aplicadas, a fim de garantir o melhor desempenho na extração de metais e polímeros presentes nesse resíduo. Para isso, dever ser feita uma caracterização prévia do material, bem como a viabilidade econômica do método.

Na recuperação de metais, a técnica que tem ganhado mais destaque é a Hidrometalurgia, isto devido seus menores custos e por ser menos agressiva ao meio ambiente. A recuperação de polímeros a partir das carcaças de monitores é feita principalmente por reciclagem mecânica, fazendo com que esses materiais venham a ser inseridos novamente na produção.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPLAST. Disponível em: [http://file.abiplast.org.br/download/links/links%202014/apresentacao\\_sobre\\_transformacao\\_vf.pdf](http://file.abiplast.org.br/download/links/links%202014/apresentacao_sobre_transformacao_vf.pdf) Acesso em 20 de novembro de 2016

AMBIENTAL. Disponível em: <http://www.ambiental.sc/servicos/limpeza-urbana/tratamento-e-disposicao-final-de-residuos/>. Acessado em 18 de outubro de 2016

AMBIENTE BRASIL., 2010. Tratamento de Lixo Tecnológico no Brasil e União Europeia. Disponível em: [www.ambientebrasil.com.br](http://www.ambientebrasil.com.br). Acessado em 02 de agosto de 2016.

CCE. Comissão das Comunidades Europeias. Relatório da Proposta Directiva do Parlamento Europeu e do Conselho: relativa aos resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos e Proposta directiva relativa à restrição do uso de determinadas substancias perigosas em equipamento eléctricos e electrónicos, 2000/0159 COD) Bruxelas 13.6.2000 87 p.

CÓRDOBA, R. E. (2010). Estudo do Sistema de Gerenciamento Integrado de Resíduos de Construção e Demolição do Município de São Carlos – SP. 2010. 406 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2010.

CORREIO BRAZILIENSE. Disponível em: [http://www.correio braziliense.com.br/app/noticia/cidades/2013/10/11/interna\\_cidades\\_df,392775/df-ja-counta-com-13-pontos-de-entrega-para-descarte-de-lixo-eletronico.shtml](http://www.correio braziliense.com.br/app/noticia/cidades/2013/10/11/interna_cidades_df,392775/df-ja-counta-com-13-pontos-de-entrega-para-descarte-de-lixo-eletronico.shtml) Acesso em 1 de novembro de 2016

EUROPEAN TOPIC CENTRE, Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), Disponível em: <http://waste.eionet.europa.eu/waste/6> Acesso em 04.set.2016

FERNANDES, R.G. Estudo de técnicas de recuperação de metais de resíduos de equipamentos eletrônicos. Trabalho de Graduação, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

GABRIEL, A.P. CARACTERIZAÇÃO E RECICLAGEM DA CARÇAÇA POLIMÉRICA DE MONITORES DE TUBOS DE RAIOS CATÓDICOS PÓS-CONSUMO. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2012

GERBASE, A. E., OLIVEIRA, C. R., Reciclagem do lixo de informática: uma oportunidade para a química. Química Nova, vol. 35 número 7. São Paulo 2012.

GOLDPRESS. Disponível em: <http://www.goldpress.com.br/descricao/8> Acesso em 20 de novembro de 2016.

HAYES, P. C.. Process Principles in Minerals and Materials Production. Hayes Publishing CO. p. 29. Brisbane, Austrália, 1993.

INESFA. Disponível em: <http://www.inesfa.org.br/downloads/painel-indicador-setorial.pdf> Acesso em: 07 de novembro de 2016.

KANETEC. Disponível em: [http://www.kanetec.co.jp/en/pdf/120\\_138.pdf](http://www.kanetec.co.jp/en/pdf/120_138.pdf) Acesso em 06 de novembro de 2016

KIRNER, N.P., TROYER, G.L., JONES, R.A., GRAY, E.W. JR.: Radioactivity in cathode ray tubes. Health Phys; 2004.

LESSA MÁQUINAS; Disponível em: [http://www.lessamaquinas.com.br/prod\\_detalhes.php?id\\_prod=11](http://www.lessamaquinas.com.br/prod_detalhes.php?id_prod=11) Acesso em 28 de novembro de 2016

MANFREDINI e SCHIANCHI. Disponível em <http://www.manfredinieschianchi.com/305-02-4PO-secadores-rotativos.htm> Acesso em 28 de novembro de 2016

MATTOS, 2008, “Os impactos ambientais causados pelo lixo eletrônico e o uso da logística reversa para minimizar os efeitos causados ao meio ambiente”. Rio de Janeiro, RJ. pp. 5-7.

MMA. Disponível em <http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-perigosos/logistica-reversa>. Acessado em 05 setembro de 2016

MMA. Disponível em <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res99/res25799.html>. Acessado em 05 de setembro de 2016

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.

PALLAMANN. Disponível em: [http://www.pallmann.eu/language/upload/pdf/R\\_114\\_Ultra-Granulator\\_PANTHER\\_A4\\_4c\\_EN.pdf](http://www.pallmann.eu/language/upload/pdf/R_114_Ultra-Granulator_PANTHER_A4_4c_EN.pdf) Acesso em 03 de novembro de 2016.

PSG Disponível em: [http://www.psgdover.com/maagfileadmin/user\\_upload/Dokumente/DataSheets/PrimoS\\_EN\\_screen.pdf](http://www.psgdover.com/maagfileadmin/user_upload/Dokumente/DataSheets/PrimoS_EN_screen.pdf) Acesso em 28 de novembro de 2016.

PNUMA, Boletim 230 2016, Disponível em: <https://nacoesunidas.org/boletim230> Acesso em 05 de setembro de 2016

PUCKETT, J, et al. The Digital Dumb: Exporting Re-use and abuse to Africa [BAN] Basel Action Network. 2005. Disponível em: <http://www.computertakeback.com/docUploads/TheDigitalDumbWeb.pdf> Acessado em 19 de outubro de 2016

RIBEIRO, J. C. J. Resíduos de equipamentos eletrônicos. Belo Horizonte, Centro Mineiro de Referência em resíduos – CMRR, 22 fevereiro de 2011

RIBEIRO, P. P. M. Concentração de metais contidos em placas de circuito impresso de computadores descartados. Projeto de graduação, Escola Politécnica UFRJ. 2013

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

RON, A., PENEV, K.. Disassembly and recycling of electronic consumer products: an overview. Technovation. Vol. 15. N 6. p.363-374. 1995.

RONE, 2016. Disponível em <http://www.rone.com.br/linhat.html> Acesso em 01 de novembro 2016

SANTANA, H. B. S. Caracterização de placas de circuito impresso de aparelhos de telefone celular visando a recuperação de metais valiosos. Dissertação de Mestrado. - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2011

SCHALCH, V.; CÓRDOBA, R.E. Estratégia para gestão de resíduos sólidos. 2009. Material didático elaborado para a disciplina de Sistema de Gestão Ambiental (CD-ROM) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2009.

SHICHENGSJ. Disponível em: [http://en.shichengsj.com/product\\_Show.aspx?id=115](http://en.shichengsj.com/product_Show.aspx?id=115) Acesso em: 28 de novembro de 2016.

SPINACE, M. A. S., PAOLI, M. A., A tecnologia da reciclagem de polímeros. Química Nova, vol. 28 número 1. São Paulo. 2005.

SOUZA, L.S., BORGES, T. F., Influência da adição do copolímero em bloco de estireno-butadieno no poliestireno de alto impacto reprocessado. Trabalho de conclusão de curso, 2011

TEIXEIRA, B.A.N.; ZANIN, M. Reciclagem e Reutilização de embalagens. In: PROSAB. Metodologias e Técnicas de Minimização, Reciclagem e Reutilização de Resíduos Sólidos Urbanos. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

UFRGS. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/alimentus1/feira/optransf/moagem.htm>  
Acesso em 05 de setembro de 2016

UNEP. Disponível em: [http://www.unep.org/pdf/Recycling\\_From\\_e-waste\\_to\\_resources.pdf](http://www.unep.org/pdf/Recycling_From_e-waste_to_resources.pdf). Acessado em 18 de outubro de 2016.

VEIT, H. M. Reciclagem de cobre de sucatas de placas de circuito impresso. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2005.

WEG. Disponível em <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-eficiencia-energetica-em-extrusoras-de-plastico-artigo-tecnico-portugues-br.pdf> Acesso em 20 de novembro de 2016

WIDMER, R et al. Global perspective on e-waste, Environmental Impact Assessment Review, Volume 25, n. 5 2005 436-458 Elsevier.

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

ZHANG, S., FORSSBERG, E.. Intelligent liberation and classification of electronic scrap. Powder Technology, v.105, p. 295-301, 1999.