



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

**LEOANNE CRISTINA BATISTA**

**PROPOSTA PARA PROCESSAMENTO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO  
DE COMPUTADORES DESKTOP OBSOLETOS DA UFRN**

NATAL  
2018

**LEOANNE CRISTINA BATISTA**

**PROPOSTA PARA PROCESSAMENTO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO  
DE COMPUTADORES DESKTOP OBSOLETOS DA UFRN**

Monografia apresenta ao Curso de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

**Orientador:** Prof. Dr. Carlson Pereira de Souza

NATAL  
2018

**LEOANNE CRISTINA BATISTA**

**PROPOSTA PARA PROCESSAMENTO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO  
DE COMPUTADORES DESKTOP OBSOLETOS DA UFRN**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Química do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

**Aprovado em:** \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Carlson Pereira de Souza (Orientador)  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

---

MSc. Raffael Andrade Costa de Melo (Coorientador)  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

---

Prof. Dr. André Luis Lopes Moriyama  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

---

MSc. Wildson Ursulino Leite  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

## RESUMO

O avanço tecnológico de Equipamentos Eletroeletrônicos (EEE) e o consumismo frenético da população favorecem constantemente a compra e troca desses equipamentos. O contínuo descarte se torna um problema ambiental devido seu acúmulo em céu aberto além da própria depreciação do equipamento com o tempo. Dentre os EEE, em especial as placas de circuito impresso de computadores obsoletos da UFRN, após se tornarem não funcional são descartados, acumulados e alienados pelo Departamento de Material e Patrimônio (DMP). Essa alienação é realizada de forma única por um valor de lote fixo estabelecido o que acaba desvalorizando os equipamentos individualmente. Uma rota para valorização de tais equipamentos é reciclar seus componentes através de um estudo já realizado experimentalmente, tratando as PCI pelo processo de lixiviação, utilizando pouca matéria prima e produzindo novos recursos secundários metálicos, poliméricos e cerâmicos. Dentro desse trabalho, realizou-se um estudo em escala piloto para atender a demanda de resíduos de placas de circuito gerados pela UFRN, analisando os equipamentos essenciais para realizar as operações unitárias estabelecidas, assim como a quantificação de PCI a ser tratada e a matéria prima necessária para tal reação. Estudou-se a análise econômica do processo com uma comparação simples entre o processo de alienação já realizado e em como o projeto contribui para diminuir os impactos gerados de modo mais sustentável.

**Palavras-chave:** PCI, lixiviação, reciclagem, metais.

## ABSTRACT

The technological advance of Electronic Electrical Equipment (EEE) and the frenetic consumerism of the population constantly favor the purchase and exchange of such equipment. Continuous disposal becomes an environmental problem due to its accumulation in open skies beyond the actual depreciation of the equipment over time. Among the EEE, in particular the printed circuit boards of obsolete computers of UFRN, after becoming non-functional are discarded, accumulated and alienated by the Department of Material and Heritage (DMP). This disposition is carried out in a unique way for a set fixed amount which ends up devaluing the equipment individually. A route for valorization of such equipment is to recycle its components through a study already carried out experimentally, treating the PCI by the leaching process, using little raw material and producing new metallic, polymeric and ceramic secondary resources. In this work, a pilot-scale study was carried out to meet the demand for residues of circuit boards generated by UFRN, analyzing the essential equipment to perform the established unit operations, as well as the quantification of PCI to be treated and the raw material necessary for such a reaction. The economic analysis of the process was studied with a simple comparison between the process of alienation already carried out and how the project contributes to decrease the impacts generated in a more sustainable way.

**Keywords:** PCI, leaching, recycling, metals.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, em seguida aos meus pais e avós por toda dedicação e suporte empregados ao longo desses anos, proporcionando todo o estudo que tenho hoje para finalização desse ciclo.

Ao orientador Carlson Pereira e André Moriyama pela oportunidade e confiança oferecida durante meu tempo no Laboratório de Materiais Nanoestruturados e Reatores Catalíticos (LAMNRC) e pela disponibilidade de me orientar neste trabalho de conclusão de curso.

Ao coorientador Raffael Melo pelas orientações e ajudas fornecidas que foram essenciais para o êxito e realização desse trabalho. Pela oportunidade de ingressar na iniciação científica, que foi de grande importância para o meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Aos professores do Departamento de Engenharia Química da UFRN por terem contribuído para a minha formação acadêmica, profissional e social, ministrando excelentes aulas e aumentando meu interesse e paixão pelo curso, em especial os professores Humberto Neves, Magna Sousa, Katherine Carrilho, Eduardo Lins e André Moriyama.

Agradeço aos amigos feitos ao longo da graduação que tornaram os dias mais agradáveis e pela força para seguir em frente a cada dificuldade apresentada ao longo desse tempo.

À Universidade Federal do Rio Grande do Norte por oferecer toda a estrutura e formação necessária para a realização desse trabalho.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO.....</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>10</b>
3.1	CLASSIFICAÇÃO DO LIXO ELETRÔNICO .....	10
3.2	PCI.....	12
3.3	CONSEQUÊNCIAS DAS COMPOSIÇÕES DAS PCI.....	16
3.3.1	<i>Componentes eletrônicos das PCI.....</i>	17
3.4	TÉCNICAS DE RECICLAGEM DE PCI.....	20
3.4.1	<i>Processo Mecânico .....</i>	22
3.4.2	<i>Processo Pirometalúrgico .....</i>	23
3.4.3	<i>Processo Hidrometalúrgico.....</i>	23
3.4.4	<i>Processo Eletrohidrometalúrgico .....</i>	24
3.4.5	<i>Processo Biometalúrgico.....</i>	25
3.5	TRATAMENTO DO SUBSTRATO POR MELO (2017).....	25
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>31</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DOS REEE DA UFRN .....	31
4.1.1	<i>Departamento de Materiais e Patrimônio (DMP).....</i>	31
4.1.2	<i>EVS Reciclagem Digital .....</i>	32
4.1.3	<i>LAMNRC.....</i>	33
4.2	CARACTERIZAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DAS PCI DA UFRN.....	34
4.2.1	<i>Composição e Componentes das PCI .....</i>	34
4.3	PROJETO PILOTO PARA PROCESSAMENTO DE PCI DA UFRN.....	34
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>36</b>
5.1	CARACTERIZAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DOS REEE DA UFRN .....	36
5.1.1	<i>Departamento de Materiais e Patrimônio (DMP).....</i>	36
5.1.2	<i>EVS Reciclagem Digital .....</i>	38
5.1.3	<i>LAMNRC.....</i>	40
5.2	CARACTERIZAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DAS PCI DA UFRN.....	42
5.2.1	<i>Componentes e composição das PCI .....</i>	42
5.3	PROJETO PARA PROCESSAMENTO DE PCI DA UFRN .....	44
5.3.1	<i>Engenharia Verde .....</i>	48
5.3.2	<i>Análise Econômica.....</i>	50
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>55</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>56</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Reciclar e valorizar os resíduos em fim de vida é uma das ações importantes nos dias atuais onde o consumo e troca de equipamentos eletroeletrônicos (EEE) tendem a crescer de forma desacelerada pelo avanço tecnológico. A correta gestão dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) além de diminuir o impacto ambiental também pode gerar benefícios econômicos devido ao valor dos materiais que o constituem.

Cada vez mais as políticas ambientais têm ganhado atenção, o que incentivou a necessidade de se obter uma rota de processamento para reciclagem adequada de tais resíduos sólidos, uma vez que também é responsabilidade do órgão público tratar seus REEE. Um caso particular são as placas de circuito impresso de computadores obsoletos da UFRN, pois além de possuir substâncias metálicas tóxicas, há materiais passíveis de reciclagem com um bom valor econômico de mercado e até mesmo formas de reutilizá-los como recursos secundários, poupando a quantidade de recursos naturais.

Há inúmeras formas para tratamento das PCI usando processos físicos, químicos e biológicos. Dentre eles o processo hidrometalúrgico possui um menor custo com menor geração de poluentes e é mais previsível, além das vantagens em ser estudado em escala preliminar.

Para que a Universidade possa tratar seus próprios resíduos, é necessário que haja um estudo de ampliação de tratamento para atender tal demanda, buscando solucionar o problema gerado, compartilhar o ciclo de vida do produto e incentivar a comunidade acadêmica em busca de uma rota de processamento mais eficiente, contribuindo assim no âmbito econômico, ambiental e social.



## **2 OBJETIVO**

O presente trabalho visou objetivar uma proposta preliminar para processar placas de circuito impresso (PCI) que utiliza a metodologia desenvolvida no LAMNRC por Melo (2017), possuindo um baixo custo e resultados satisfatórios, reduzindo o impacto ambiental, valorizando os recursos secundários e incentivando a comunidade acadêmica a dar continuidade ao estudo realizado de forma a aprimorá-lo, gerando resultados ainda melhores.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 Classificação do Lixo Eletrônico

Também chamados de Equipamentos Eletroeletrônicos (EEE), são dispositivos que utilizam, armazenam, geram, transmitem ou medem corrente elétrica ou campo magnético enquanto estão em funcionamento. Televisores, geladeiras, computadores, celulares, lâmpadas, pilhas e baterias são alguns exemplos de EEE (Carvalho & Xavier, 2014).

Tais equipamentos quando não possuem mais serventia, tornando-se não funcionais, são chamados de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), e para facilitar a compreensão sob os mesmos, a Comunidade Europeia classificou-os em 11 categorias por meio da diretiva n° 65 de 2011.

Tabela 1 – Classificação dos REEE segundo a Classificação Europeia

<b>Categoria</b>	<b>Exemplos de Equipamentos</b>
1. Eletrodomésticos de grande porte	Refrigeradores, freezers, fogões, etc
2. Eletrodomésticos de pequeno porte	Aspiradores de pó, torradeiras, fritadeiras, etc
3. Equipamentos de TI e comunicação	Computadores, celular, aparelhos de faz, etc
4. Equipamentos de consumo e painéis fotovoltaicos	Instrumentos musicais, câmeras de vídeos, aparatos de rádio e TV, painéis fotovoltaicos, etc
5. Equipamentos de Iluminação	Lâmpadas fluorescentes, luminárias, etc
6. Ferramentas eletroeletrônicas	Furadeiras, parafusadeiras, etc
7. Equipamentos de lazer, esporte e brinquedos	Vídeo games, trens e carro elétricos, equipamentos para esporte, etc
8. Equipamentos médicos	Equipamentos para radiologia, cardiologia, etc
9. Instrumentos de monitoramento de controle	Dectetor de fumaça, termostato, regulador de aquecimento e resfriamento, etc
10. Caixas de autoatendimento	Caixas de autoatendimento, dinheiro, etc
11. Outros	Desconsiderados nas categorias anteriores

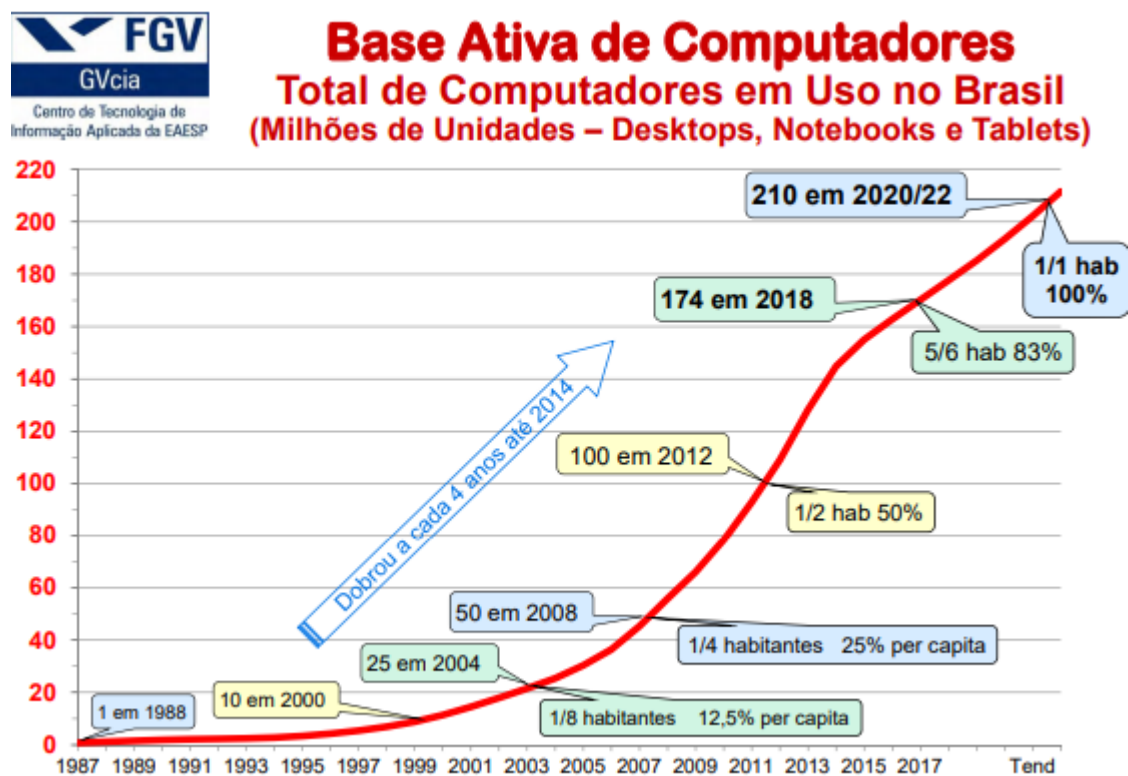
Fonte: Melo (2017)

Tem-se a visão de que esse lixo vem crescendo de forma intencional pelas empresas ao desenvolver frequentemente novos produtos no mercado com obsolescência programada. Segundo um estudo da Greenpeace (2009), um computador tinha em 1997 uma vida útil de seis anos, enquanto que em 2005 a sua vida útil passou para dois anos.

Esse desenvolvimento de novos equipamentos gera na sociedade um consumo frenético a fim de se obter sempre o melhor e mais novo, sem a percepção de que esses equipamentos possuem metais e substâncias tóxicas em seus componentes. Trazendo assim riscos à saúde, seguido de mais um problema ambiental e social (Afonso, 2014).

Temos como exemplo o aumento no consumo de computadores e similares entre os anos de 1988 e 2016 indicado no gráfico abaixo.

Gráfico 1 - Curva do crescimento de computadores em uso no Brasil ao longo dos anos



Fonte: FGV-EAESP-GVcia (2018)

Estima-se que cerca de 100 milhões de unidades desse aparelho sejam descartados todos os anos por se tornarem obsoletos aos seus usuários (Carvalho & Xavier, 2014). A Europa, como maior produtor mundial da atualidade, descarta de REEE avaliados em 6,5 milhões de toneladas por ano (Oliveira, 2012). Já entre os países emergentes, o Brasil é o que mais gera lixo eletrônico por ano. Entre esses resíduos estão 97 mil toneladas métricas de computadores e 2,2 mil toneladas de celulares. (Journeé, 2018; PNUMA, 2018).

Enquanto esses aparelhos estiverem vedados sem nenhuma violação ou manipulação de seus componentes eles podem ser utilizados sem nenhuma preocupação. Porém, quando vira obsoleto, precisa ser descartado de forma correta, uma vez que possui diversos materiais prejudiciais ao meio ambiente e para o ser humano. O chumbo, cádmio, níquel, mercúrio e zinco são exemplos desses compostos tóxicos prejudiciais, podendo causar desde náuseas á câncer, levando até a morte.

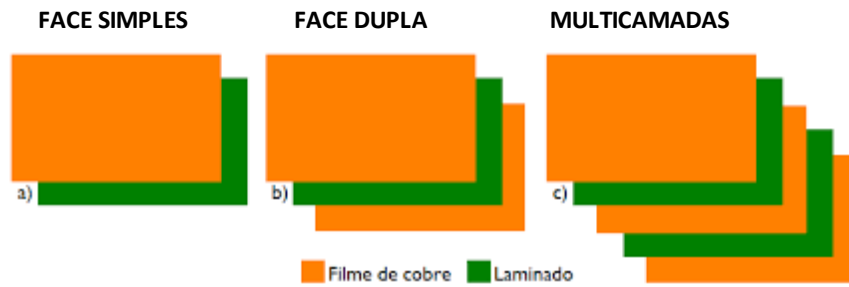
### **3.2 PCI**

Computadores, smartphones, tablets, brinquedos, máquina de lavar e chuveiros são exemplos de dispositivos que necessitam dessas placas para desempenhar suas respectivas funcionalidades. A placa de circuito impresso (PCI) é indispensável na grande maioria dos projetos eletroeletrônicos tendo dupla finalidade: sustenta os componentes e fornece os percursos para as correntes exigidas para a operação (Braga, 2018). Elas são constituídas basicamente por três partes principais: substrato não condutor, circuito impresso condutor e componentes eletrônicos montados na superfície da placa (Kasper, 2011; Guo et al.,2015).

Atualmente, existem três tipos de placas: placas cujos componentes estão apenas ligados a uma das superfícies da placa (face simples); placas com ligações nas duas superfícies (face dupla) e por último as placas mais avançadas, as multicamadas que consistem na sobreposição de diversas camadas condutoras (PWBRC, 2018). Portanto, as PCI podem ser classificadas pela quantidade de camadas, são elas:

- a) Face Simples;
- b) Face Dupla;
- c) Multicamadas.

Figura 1 – Classificação das PCI quanto ao número de camadas



Fonte: Ventura (2014)

Outra classificação dada as PCI é em relação aos metais nobres que possuem, sendo um deles o ouro. Assim, consideram-se dois tipos de placas: placas ricas e placas pobres. Uma PCI é rica se possuir mais de 200 ppm de ouro ou pobre se a quantidade de ouro for inferior a este valor (RECIMP, 2009)

Como a identificação dessas PCI são difíceis de serem visualizadas, considera-se que as placas pobres são aquelas que possuem uma grande quantidade de plástico associada a sua área total, e as poucas quantidades ou até mesmo ausência de processadores. As placas ricas apresentam grande quantidade de componentes contando com um maior número de processadores e poucos ou quase ausentes de condensadores, como se vê na figura abaixo.

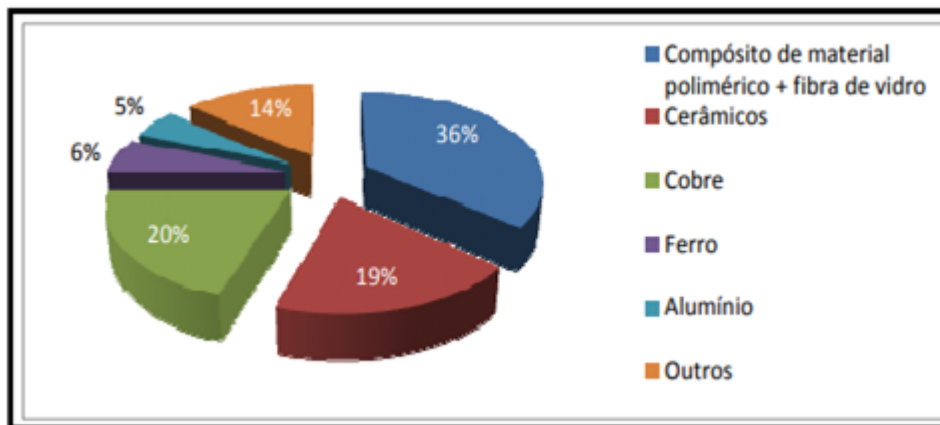
Figura 2 – Exemplo de placa pobre e placa rica



Fonte: Batista (2018)

A coloração da base da placa não tem relação em ela ser rica ou pobre, é apenas a cor do tipo de polímero utilizado. Na figura abaixo temos a porcentagem dos componentes presentes em uma placa de circuito comum onde os de denominações “outros” referem-se aos metais raros como prata, ouro, paládio, antimônio, bismuto, etc.

Gráfico 2 – Composição médias das PCI



Fonte: Abrantes (2009)

De início, o material utilizado como substrato na fabricação de placas de circuito impresso era o fenolito, uma mistura de resina fenólica e uma carga orgânica, normalmente papel picado ou serragem de madeira. Porém, devido a celulose, esse material passou a apresentar características hidrocópicas influenciando assim no desempenho por meio da perda da propriedade isolante ou mesmo na deformação mecânica da placa (Oliveira, 2012).

Devido a esses problemas, esse material foi substituído por um substrato a base de resina epóxi revestido internamente por uma fina camada de fibra de vidro. Agora, os materiais poliméricos mais utilizados são o polietileno, polipropileno, poliésteres, policarbonatos e fenolformaldeídos. O teflon e o poliéster são outras duas alternativas de substrato (Abrantes, 2009). Além disso, todos os tipos de substratos utilizados na fabricação das PCI são reforçados com retardadores de chama que possuem em sua composição elementos bromados, clorados, fosforo ou azotos com a função de inibir ou mesmo suspender o processo de combustão (Petter, 2012).

Além dos polímeros, as PCI são constituídas por diversos metais e cerâmicas. Os principais metais encontrados são: cobre, ferro, estanho, cromo, mercúrio, zinco, níquel e chumbo (Birloaga&Vegliò, 2016). Já as cerâmicas geralmente encontradas são: sílica, alumina, mica e titanato de bário (Moraes, 2011).

A composição material das PCI varia com o tipo de EEE. Por exemplo, as placas de celulares possuem um maior percentual em peso de metais e fibras de vidro quando comparadas com as de computadores e televisores.

Tabela 2 – Composição material de PCI de computadores, televisores e celulares

<b>Material</b>	<b>Computadores % em peso</b>	<b>Televisores % em peso</b>	<b>Celulares % em peso</b>
Metais e fibras de vidro	32,0	32,1	83,1
Orgânico	68,0	67,9	16,9

Fonte: Tomasek et al. (2000)

Essa variação deve-se ao fato das PCI de celulares serem produzidas em multicamadas com pelo menos quatro camadas de cobre entre as fibras de vidro, diferentemente das placas de computadores e televisores produzidas em face simples ou dupla (Carvalho & Xavier, 2014).

Existem três processos de obtenção das ligações/circuitos impressos, os quais são (Quiroz, 2018):

- a) Processo Aditivo: Não envolve corrosão, pois a obtenção do plano de ligações impressas é feita por meio da eletrodeposição seletiva do cobre na base dielétrica. Resulta em uma maior economia de cobre, mas não é tão indicado caso o plano condutor seja grande;
- b) Processo Subtrativo: É feita a remoção seletiva da folha condutora por meio do ataque químico do cobre para obter o traçado condutor. Já a placa, em seu interior, é constituída por um conjunto de placas de face dupla e em seu exterior são recobertas por uma fina camada de cobre onde é impressa a imagem do circuito através de um processo serigráfico ou por laminação de filmes. O processo é simples e o mais usado;
- c) Processo Semi-Aditivo: é a combinação dos dois processos citados acima. Para obtenção das ligações, é feita a metalização do traçado desejado e em seguida é feito o ataque química no plano não condutor não metalizado.

Por fim, a composição e fabricação das placas de circuito impresso dependerão da finalidade do seu uso, podendo sofrer mudanças sofisticando a PCI ou até mesmo tornando-a mais simples. Os componentes nela inseridos, como resistências, condensadores, bobinas, díodos e transistores também dependerão do tipo e da finalidade. Essas peças controlam ou modificam os sinais elétricos de um circuito, podendo ser fixada á placa por meio de soldas, cola ou encaixe. São constituídas por um leque de variedades de elementos como, por

exemplo, o silício, antimônio, semicondutores, chumbo, cádmio, estanho, zinco, bismuto, prata, cerâmicas e vidro.

### 3.3 Consequências das composições das PCI

A placa de circuito impresso é extremamente heterogênea que dificulta sua reciclagem, mas se torna um bom recurso secundário devido a grande concentração de cobre e materiais cerâmicos. Além disso, as substâncias tóxicas presentes torna o processo necessariamente ambiental e não somente econômico.

A composição das PC varia de acordo com o tipo, mas em linhas gerais são compostas de vários metais, ligas metálicas, compostos orgânicos e inorgânicos (James E. Hoffmann, 1992).

- a) Polímeros: em média 30% em peso, principalmente poliolefinas, poliésteres e policarbonatos;
- b) Óxidos refratários: em torno de 30% em peso, onde a sílica é 50%, alumina 20%, óxidos de terras raras 20% e 10% de outros óxidos;
- c) Metais base: em torno de 40% do peso total, composto de 50% de cobre, 20% de estanho, 10% de ferro, 5% de níquel, 5% de chumbo, 5% de alumínio e 3% de zinco;
- d) Metais preciosos: em torno de 1655 g/ton de prata, 850 g/ton de ouro e 42 g/ton de paládio.

Algumas dessas substâncias são seriamente prejudiciais á saúde humana. A engenheira ambiental Fátima Souza da empresa Suzaquim nos fala que os indivíduos envenenados por esses elementos serão tratados pelos sintomas, dificilmente o médico vai identificar o que causou a doença, a não ser que o índice de recorrência em uma certa região seja muito alto.

A contaminação pode ser direta ou indireta, a direta acontece pelo contato direto das pessoas que manipulam esses componentes. Já a contaminação indireta é o mais recorrente, uma vez que esses resíduos chegam aos lixões e se dispõem a céu aberto, contaminando o solo e chegando aos lençóis freáticos afetando a água da irrigação e gerando uma cadeia infecciosa.

- a) Chumbo: Danos no sistema nervoso, na medula óssea e nos rins (órgãos críticos);



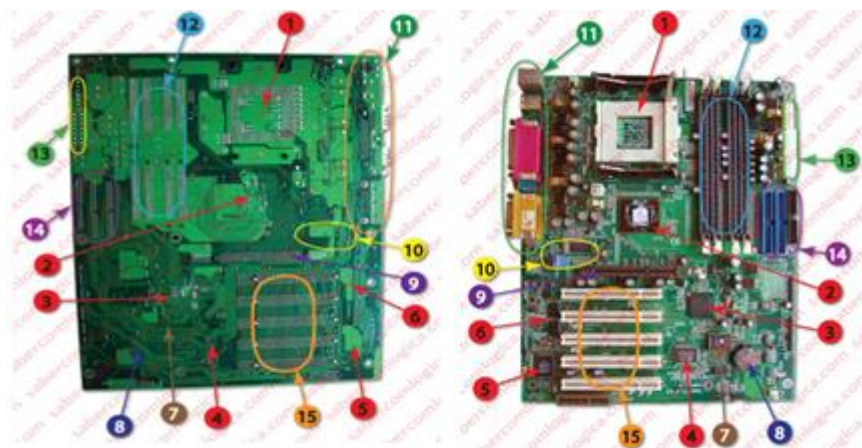
- b) Alumínio: Danos neurológicos (Dislexia, Alzheimer, Osteoporose);
- c) Níquel: Alterações hormonais
- d) Retardantes de chamas (BRT): Causam desordem hormonais, nervosas e reprodutivas;
- e) Sílica: Inflamação no pulmão.

Os polímeros presentes normalmente não são biodegradáveis, assim, tornam-se poluidores agressivos, sendo necessário de trinta a cem anos para serem degradados. Contaminam os mares causando a morte de animais; aumentam o volume nos aterros sanitários; impurificam o solo; poluem o ar ao serem incinerados.

### 3.3.1 Componentes eletrônicos das PCI

Vários componentes trabalham junto da placa para garantir a gestão de sua utilidade, como os chips, condensadores, resistores, reguladores de tensão e outros. A figura abaixo exemplifica os constituintes agregados de modo mais técnico.

Figura 3 – Placa de Circuito na visão frontal e posterior

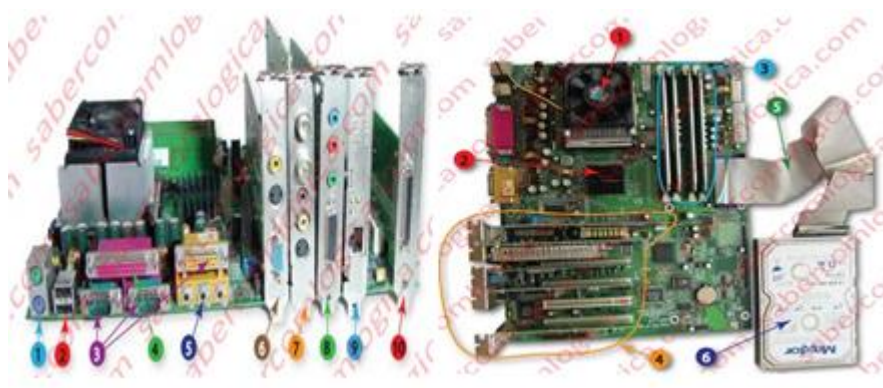


Fonte: Lógica (2018)

- 1) Socket para encaixe da CPU;

- 2) Chip Northbridge que faz a ligação para os slots de memórias e para o slot AGP (Accelerated Graphics Port) na parte de trás, como também sua ligação com a CPU, conhecida por FSB (Front Side Bus) na parte frontal;
- 3) Chip Southbridge que faz a ligação com os slots PCI na parte frontal, na parte de trás com o Chip Súper I/O, com o BIOS e com as fichas IDE/PATA destinados ao HDD e ao CD/DVD;
- 4) Chip Súper I/O, as ligações são na parte de trás da placa que ligamás saídas standar com as destinadas á drive e disquetes;
- 5) Chip Áudio de controle do áudio OnBoard;
- 6) Chips de controle das portas;
- 7) Chip do BIOS;
- 8) Bateria de Lithium;
- 9) Slot AGP destinado ás placas de vídeo;
- 10) Gerador de frequência acoplado com um conjunto de interruptores, e o chip PLL (Phase Locked Loop) que retifica a frequência do cristal de quartzo metalizado acoplado e produz todas as frequências de operação. é este o conjunto que constitui o Clock;
- 11) Conjunto de fichas das ligações standard incorporados na placa;
- 12) Slots para encaixe dos módulos de memória, conhecido como pentes de memórias;
- 13) Fichas para alimentação da placa e todos os componentes ligados aos seus slots (memórias e placas filhas AGP e PCI);
- 14) Ficha de ligação IDE/PATA, destinadas ás unidades internas de Disco Rígido, CD/DVD e disquetes;
- 15) Slots PCI.

Figura 4 – Placa preenchida na visão lateral e frontal



Fonte: Lógica (2018)

Da figura 2 a)

- 1) Tomadas PS2 para ligação de rato e teclado;
- 2) Tomadas USB;
- 3) Portas série COM;
- 4) Porta Paralela LPT1
- 5) Entradas e saídas áudio do sistema onboard;
- 6) Placa de vídeo com conexões VGA, SVídeo e vídeo composto;
- 7) Placa de captura de vídeo e TV com as conexões de Antena TV e FM, saída de fones e conexões de vídeos composto SVídeo;
- 8) Placa de som, com as saídas estéreo E/D, a saída para fones e para Joysticks analógicos;
- 9) Placa Ethernet, para ligação de redes de computadores e internet com uma tomada RJ45;
- 10) Placa SCSI para ligação a componentes externos com a norma SCSI.

Da figura 2 b)

- 1) A CPU foi colocada no respectivo socket e sobre ela foi colocado um dissipador de energia térmica ventilado;
- 2) Sobre o Northbridge foi também colocado um dissipador térmico, na figura 1a) o a massa branca em cima tem o intuito de melhorar o contato entre o chip e o dissipador;
- 3) Os módulos de memória RAM já se encontram colocados;
- 4) Diversas **Placas Filhas** estão colocadas nos slots PCI;
- 5) Um **cabo Ultra ATA** de 80 condutores e com três conectores: azul ligado ao sistema, preto ao Master e cinzento ao slave. Master e Slave são os nomes dados aos discos rígidos principal e secundário;
- 6) **Disco rígido IDE/PATA**, que usa uma interface Integrated Device Electronics/Parallel Attachment.

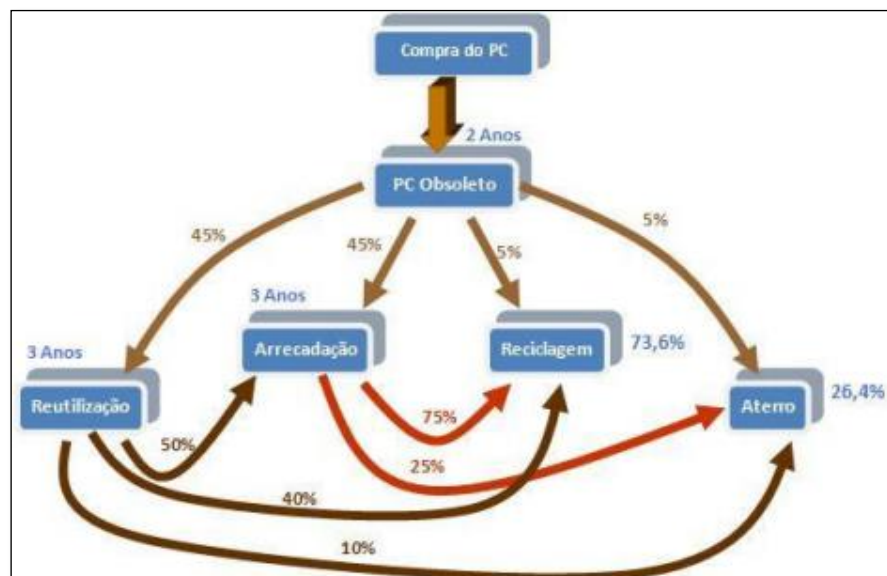
### 3.4 Técnicas de Reciclagem de PCI

Para se descartar um computador obsoleto no Brasil, o mais indicado a se fazer é procurar uma empresa de reciclagem, porém poucas são as empresas que operam nesse ramo com tecnologia apropriada e condições de preservação ambiental. Desse modo, a maior parte da sucata eletrônica do Brasil acaba sendo despejada nos aterros sanitários junto com outros tipos de lixo. Para evitar esse tipo de disposição inapropriada nos aterros, esses microcomputadores usados devem ser coletados e processados para reutilização parcial ou total de seus componentes, e/ou para a recuperação de metais, vidros, plásticos e materiais em geral (Martins et al, 2014).

Normalmente, uma boa parte desses equipamentos obsoletos acaba por ser armazenado em arrecadações por períodos que podem ir até três anos. Estima-se que o número de equipamentos assim armazenados ascendeu em 2005 a 150 milhões de computadores (Scott, 1997).

No fluxograma abaixo podemos perceber como é feita a gestão de resíduos levando em conta o número de anos e porcentagem de computadores após se tornarem não funcionais. Observando que a porcentagem de computadores que são reutilizados e os que são armazenados em arrecadações constituem a maior fração na hierarquia de gestão dos resíduos deste tipo de equipamentos.

Figura 5 – Gestão de Resíduos



Fonte: Abrantes (2009)

Levando em conta que cada computador pese em média 2,3 kg, ocupando um volume de aproximadamente 100 dm<sup>3</sup>; um computador portátil pese em média, 3,5 kg e ocupa um volume de 4 dm<sup>3</sup> e ainda que a fração de vendas de PC portáteis é de 20% do total de vendas, pode-se avaliar as implicações em termos de espaço se os PC's fossem todos colocados em aterro sem passar pela reciclagem. O volume de todos estes PC's colocados em aterro daria aproximadamente 9 milhões de m<sup>3</sup>, o que seria o equivalente a encher trinta estádios de futebol, num total de três milhões de toneladas de resíduos com uma quantidade de chumbo que ascenderia a 260 mil toneladas (Abrantes, 2009).

Estes valores nos alertam da necessidade de tratar esses computadores para não só diminuir em termos de volume os resíduos a enviar para aterro como também eliminar o perigo de suas substâncias tóxicas e reutilizar materiais importantes.

Tabela 3 - Principais materiais utilizados na fabricação de um computador

<b>Material</b>	<b>% em relação ao peso do computador</b>	<b>% que pode ser reciclado</b>	<b>Localização no Computador</b>
Plástico	22,9907	20	Revestimento da CPU e monitor. Inclui compostos orgânicos e outros óxidos
Chumbo	6,2988	5	Estruturas metálicas do computador Placas de circuito impresso Tubos de raios catódicos de monitores
Alumínio	14,172	80	Condutores Placas de circuito impresso Tubos de raios catódicos de monitores
Ferro	20,471	80	Estruturas metálicas do computador
Estanho	1,007	70	Circuitos integrados Placas de circuito impresso
Cobre	6,928	90	Fios e cabos Placas de circuito impresso Tubos de raios catódicos de monitores
Níquel	0,8503	80	Estruturas metálicas do computador Placas de circuito impresso Tubos de raios catódicos de monitores

Zinco	22,046	60	Baterias
Ouro	0,0016	98	Placas de circuito impresso Condutores elétricos
Prata	0,0189	98	Placas de circuito impresso Condutores elétricos

Fonte: PEDERSEN et al, 1996

Pela tabela, observa-se o quanto se pode reciclar dentre os principais materiais utilizados na fabricação de um computador pessoal, assim como onde esses componentes estão localizados. Dos 33 componentes citados, aproximadamente 60% deles estão localizados nas placas de circuito impresso.

Dentre os tipos de reciclagem de PCI, há técnicas normalmente utilizadas por outros autores reunidas em cinco grupos diferentes de processos: mecânicos, pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos, eletrometalúrgicos e biometalúrgicos (Choubey et al., 2015; Birloaga et al., 2014).

### **3.4.1 Processo Mecânico**

A base do processo mecânico é o desmantelamento da placa de forma manual, sendo algumas vezes necessários usar sopradores térmicos ou chapas de aquecimento para derreter algumas soldas (Ferreira, 2013).

Essa fragmentação da placa é feita em moinhos de martelo ou de facas, aumentando a superfície de contato das partículas. Dependendo das condições de moagem pode haver uma concentração de cada tipo de material por faixa granulométrica (Juchneski, 2013).

Após o processo de moagem, há a separação por densidade, magnética e eletrostática. A de densidade consiste em separar por tamanho da partícula sendo efetuado por elutriação, em mesas separadoras ou em meios densos. A separação magnética está relacionada ao conteúdo a ser atraído ou repelido sendo usados separadores de tambor, de rolos induzidos, de correias cruzadas ou de carrossel. A eletrostática ocorre pela exposição das PCI ao campo elétrico, assim as partículas são carregadas e concentradas como material condutor, misto e não condutor (Moraes, 2011).

### **3.4.2 Processo Pirometalúrgico**

A incineração, fusão, pirólise e reações de fase gasosa em alta temperatura são os principais processos pirometalúrgicos que geralmente são utilizados na reciclagem de PCI (Veit, 2005). Não se faz necessário utilizar processos mecânicos para tal, mas moendo-o a reação se dá de uma forma mais homogênea.

Utiliza altas temperaturas separando as três fases da placa: cerâmica, polímeros e metais. A parte cerâmica fica em forma de escória, os polímeros são degradados devido ao calor e os metais são concentrados em uma fase metálica.

Em 2010, Long, et al. (2010) publicou um estudo com processo de pirólise a vácuo com um pré tratamento mecânico. Nesse experimento, usou-se de um reator de leito fixo no qual houve a decomposição da matéria orgânica, gerando uma fração gasosa e líquida com alto teor energético. O estudo teve a intenção de recuperar o cobre, obtendo-se um lote de material com um teor de 99,5% e uma recuperação de 99,9%.

Porém, esse processo contribui para a poluição atmosférica liberando emissões gasosas nefastas como dioxinas, furanos, materias isolantes, cloretos e outros. Também influencia na eficiência final do projeto, uma vez que há perdas de metais nobres e de base devido ao volume de cerâmicas e vidros encontrados na escória formada no forno e quase que nenhuma recuperação para o alumínio e zinco (Oliveira, 2012; Guo et al., 2010; Fogarasi et al., 2015).

### **3.4.3 Processo Hidrometalúrgico**

O processo hidrometalúrgico promove a dissolução integral ou seletiva dos diferentes metais presentes nas PCI promovendo o contato interfacial deste sólido com soluções ácidas, alcalinas ou salinas numa reação denominada lixiviação (Ranitovic et al., 2016). Essa técnica também é seguida por etapas de separação como filtração, extração por solventes e precipitação, para recuperar os metais dissolvidos, assim como requer um pré-tratamento mecânico visando a diminuição do volume e aumento da superfície de contato.

A lixiviação ácida é normalmente a mais utilizada para dissolver os diferentes metais presentes nas PCI (Somasundaram et al., 2014). O ácido nítrico apresenta propriedades oxidantes e por essa razão solubiliza os metais mais facilmente. Já os ácidos clorídrico e sulfúrico não solubilizam bem alguns metais e podem gerar cloretos e sulfetos insolúveis, porém para esses casos o processo é otimizado mediante a adição de agentes oxidantes (Oliveira, 2012).

Há também a geração de resíduos tóxicos que são os efluentes provenientes das soluções lixiviantes. Porém ao comparar com o processo mencionado anteriormente, este processo é mais fácil de controlar, requer uma demanda menor de energia e é mais previsível. Menor custo, menor geração de poluentes atmosféricos, maior taxa de recuperação de metais e possibilidade de aplicação em menor escala são algumas das vantagens presentes nesse processo. (Yamane, 2012; Kumari et al., 2016).

#### ***3.4.4 Processo Eletrohidrometalúrgico***

Conhecido também como processo eletroquímico, estes se baseiam nas reações de oxirredução não espontâneas que ocorrem através de eletrólitos aquosos ou sais fundidos. Contudo, como os metais necessitam ser solubilizados, as operações de lixiviação estarão sempre presentes e com elas a produção de efluentes líquidos (Veit, 2005; Duan, 2011; Schweickardt, 2006).

A obtenção de metais provenientes de resíduos de PCI pode ser realizada de duas formas: electro-refinação e electro-extração. O primeiro método é empregue quando o ião metálico que se pretende recuperar se encontra no estado metálico misturado com outros elementos - ânodo «impuro» - enquanto o segundo se utiliza quando o eletrólito contém o ião metálico que se pretende obter (Veit, 2005; Schweickardt, 2006)



### **3.4.5 *Processo Biometalúrgico***

Essa técnica usa a ação de microrganismos, geralmente bactérias, para solubilizar os metais. Ainda vem sendo estudado, mas já nos mostra bons resultados visto que a biolixiviação, como também é conhecida, se destaca em relação aos processos hidrometalúrgicos por gerar economia de insumos, apresentar simplicidade nas instalações e não necessitar de mão de obra especializada durante a operação (Oliveira, 2012).

Xiang et al. (2010) publicou um estudo que visava observar as condições ótimas da biolixiviação utilizando bactérias enriquecida por uma porção de efluente ácido de uma exploração mineira. O metal foi eficientemente solubilizado em cinco dias, alcançando uma extração de 95% de cobre em condições especiais.

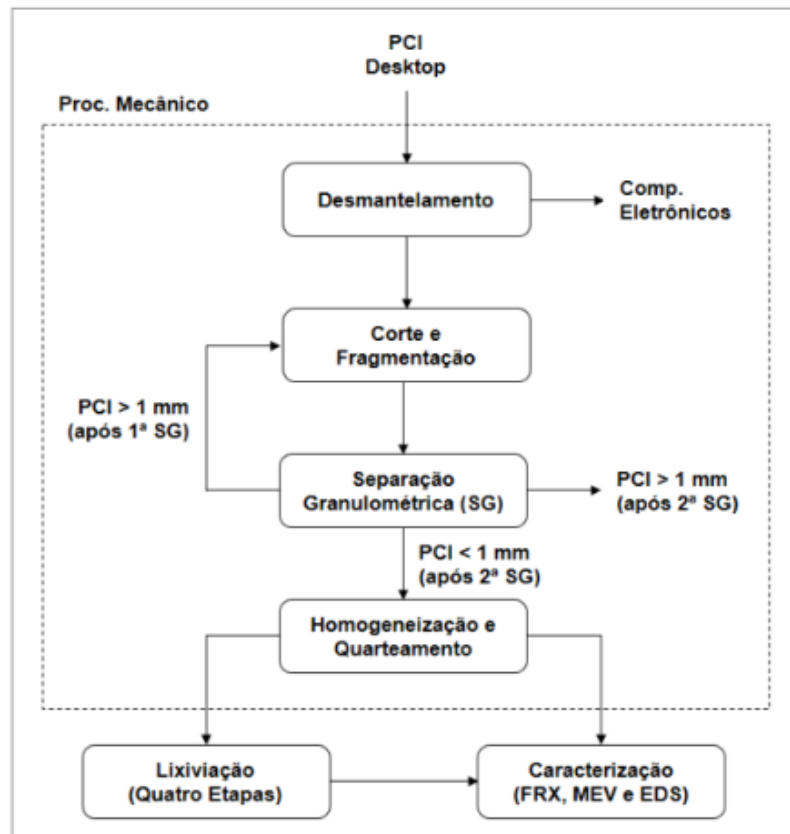
Apesar de promissora, o tempo de ataque necessário para que os agentes biológicos promovam a lixiviação podem durar semanas e a necessidade de exposição dos metais em forma de camadas superficiais são os dois principais fatores negativos associados a essa técnica (Veit, 2005). Além desses pontos negativos, a biometalurgia requer condições bem específicas, pois se tratando de microrganismos qualquer parâmetro alterado influencia de modo drástico na reação. Assim, parâmetros como pH, temperatura, potencial redox, gases dissolvidos e outros devem ser controlados rigidamente.

### **3.5 Tratamento do Substrato por Melo (2017)**

Vários estudos já visam a valorização desses REEE desde meados dos anos 60. Os fundamentos tecnológicos mais aplicados são associadas à área de metalurgia em conjunto com os processos físicos/mecânicos, sendo eles os processos pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos, eletrometalúrgicos e biometalúrgicos.

O fluxograma abaixo nos mostra a metodologia aplicada desde o desmantelamento da placa à lixiviação final.

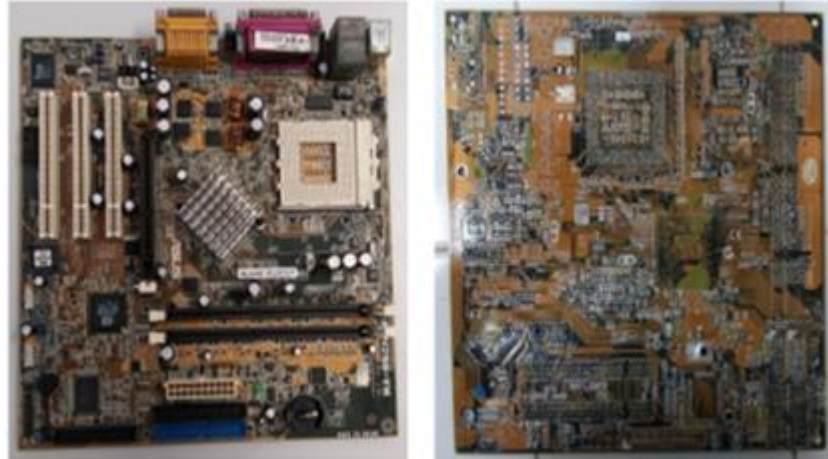
Figura 6 – Fluxograma experimental geral



Fonte: Melo (2017)

Inicialmente, há a retirada dos componentes eletrônicos soldados à placa (capacitores, diodos, resistores, etc.), no qual não são descartados, e sim armazenados para futuros trabalhos. Tendo em mãos apenas a placa de interesse, é feito o corte, a fragmentação, a separação granulométrica e a homogeneização do pó obtido. No corte, atinge-se pequenas placas de área de aproximadamente  $4 \text{ cm}^2$  que em seguida passa por um moinho de oito facas a fim de transformá-la em pó, com granulometria menor que 1 mm.

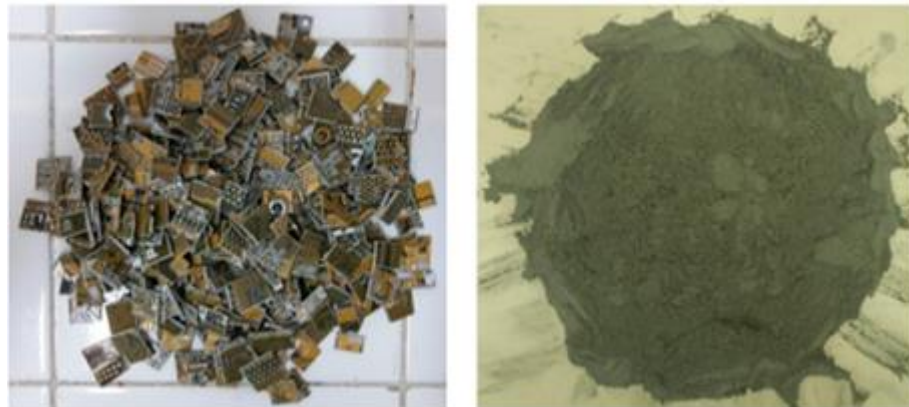
Figura 7 – Desmantelamento das PCI antes e depois



Fonte: Melo (2017)

Para a separação granulométrica, as partículas de interesse foram aquelas inferiores a 1 mm. Assim, a porção que ficava retida na peneira de 16 TYLER/MESH de abertura retornava ao moinho de facas e assim sucessivamente. Para esta faixa de trabalho, os diversos constituintes presentes já não se encontram envolvidos por outros materiais, seja ele cerâmico ou polimérico, favorecendo a superfície de contato. Após os processos mecânicos, a PCI foi homogeneizada e caracterizada, estando pronta para o processo de lixiviação.

Figura 8 – Corte e Fragmentação depois do corte e fragmentação



Fonte: Melo (2017)

Em todas as etapas mencionadas houve perda de massa, porém quase irrelevante ao processo como um todo. A placa após o desmantelamento, sem os componentes eletrônicos, pesava aproximadamente 207,27 g, e após todas as técnicas aplicadas perdeu-se o equivalente a 1,59% da massa inicial, ou seja, em média 0,53% por etapa.

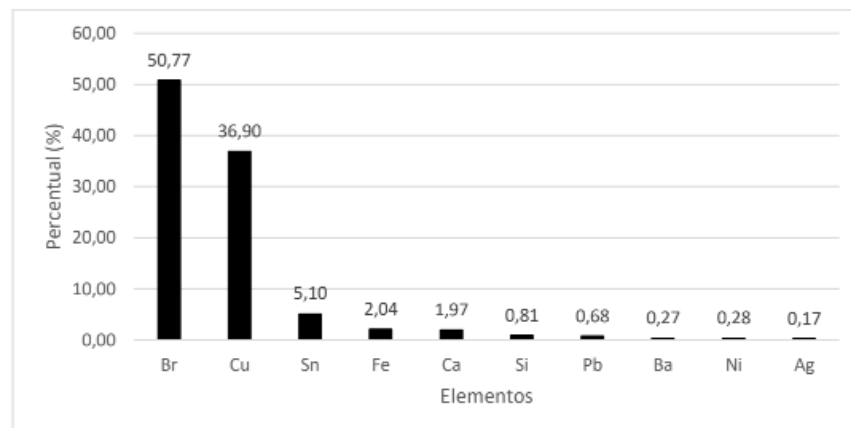
Tabela 4 – Perdas de massa por etapa de processamento mecânico

<b>Etapas</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Perdas (g)</b>	<b>Perdas (%)</b>
PCI desmantelada (inicial)	1243,6	-	-
PCI cortada	1237,1	6,5	0,52
PCI fragmentada	1230,2	6,9	0,56
PCI classificação gran. (final)	1223,9	6,3	0,51
<b>Total</b>	<b>-</b>	<b>19,7</b>	<b>1,59</b>

Fonte: Melo (2017)

Em seguida analisou-se o material a ser estudado pelas técnicas de caracterização como FRX, MEV e EDS que tem o intuito de identificar e quantificar os elementos que formam a placa de circuito e sua morfologia. Pela método de fluorescência de Raio X, é quantificado os elementos químicos presentes, porém elementos de baixo peso molecular (hidrogênio, carbono, nitrogênio e oxigênio) não são identificados. Outros elementos como cromo, titânio, enxofre, estrôncio, magnésio, manganês, zircônio e actínio também foram identificados, porém em quantidades bem menores.

Gráfico 3 – Composição das PCI analisadas por FRX



Fonte: Melo (2017)

Após o processamento mecânico e sua caracterização, o procedimento da lixiviação com solução ácida foi estudado, buscando atingir um maior percentual lixiviado. Os meios ácidos estudados foram com água régia pura, água régia diluída. O melhor percentual obtido foi com a água régia diluída, com média de 42,3%.

Em seu estudo, ele utilizou um balão de fundo chato com três juntas angulares acoplados a um condensador para um melhor controle do evaporado. 10 g da placa moída foi agitada durante 6 horas em 200 ml de solução ácida. Temperatura e concentrações foram as variáveis independentes testadas a fim de se obter um melhor percentual de lixiviado. A tabela a seguir mostra a sequência do planejamento experimental realizada com água régia diluída.

Tabela 5 – Matriz do planejamento experimental para água régia diluída

Ensaio	T (°C)	C (mol/L)	L (%)	Ordem de Execução
1	50	2	34,07	3
2	80	2	33,23	1
3	50	4	41,47	4
4	80	4	42,32	2
5	65	3	40,1	5
6	65	3	40,03	6
7	65	3	39,76	7

Fonte: Melo (2017)

A relação molar empregada foi de 1:3 de HNO<sub>3</sub> e HCl com diluição. O percentual de massa lixiviada (L) foi a variável dependente avaliada. Pela análise gravimétrica, observa-se um bom rendimento no ensaio quatro de 42,32% para a temperatura de 80 °C. Análises de FRX também foram realizadas com intuito de identificar os elementos químicos que foram dissolvidos ao longo da reação.

Tabela 6 – Composição das escórias lixiviadas com água régia diluída e analisadas por FRX

Ensaio	Br (%)	Cu (%)	Sn (%)	Fe (%)	Ca (%)	Si (%)	Pb (%)	Ba (%)	Ni (%)	Ag (%)
1	77,11	18,43	1,09	0,29	0,79	1,27	0,1	0,04	0,03	0,23
2	83,36	3,84	9,19	0,27	1,1	1,1	0,2	0,19	0,01	0,23
3	94,37	2,9	0,2	0,13	0,28	1,29	0,1	0,25	0,02	0,12
4	34,52	2,19	0,5	0,15	0,3	1,5	0,06	0,14	0,02	0,04
5	92,15	4,98	0,52	0,09	0,4	1,24	0,03	0,07	0,01	0,13
6	94,42	2,16	0,49	0,19	0,5	1,39	0,12	0,18	0,01	0,15
7	93,82	2,66	0,52	0,19	0,49	1,47	0,09	0,1	0,01	0,13
<b>Total</b>	<b>50,77</b>	<b>36,9</b>	<b>5,1</b>	<b>2,04</b>	<b>1,97</b>	<b>0,81</b>	<b>0,68</b>	<b>0,27</b>	<b>0,28</b>	<b>0,17</b>

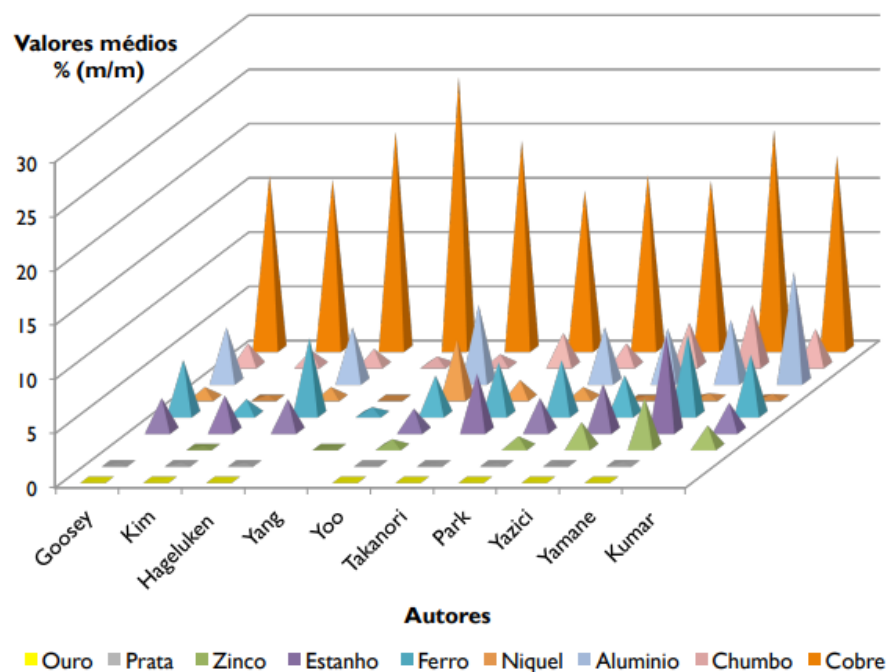
Fonte: Melo (2017)

Nos resultados representados acima, a última linha corresponde a composição das PCI antes dos ensaios de lixiviação para uma análise comparativa. Consta-se que todos os metais analisados são suscetíveis a serem dissolvidos utilizando-se a água régia diluída. Atentando-se apenas ao quarto ensaio, percebemos bons resultados de lixiviação. O cobre, principalmente, reduziu seu percentual de 36,90% para 2,19%, assim como o chumbo, o níquel e a prata que foram praticamente totalmente lixiviados, mesmo este mostrando certa dificuldade em outros ensaios.

O aumento percentual em alguns dos elementos é justificado pela dissolução dos metais no todo. O bromo é constituído por polímeros retardadores de chama, por isso representava 50,77% e após o ensaio passou a ser 94,52%. Assim como o silício que é composto por fibras de vidro insolúveis ao meio, apresentando um aumento percentual das escórias em relação a composição das PCI originais que era de 0,81% e passou a ser 1,50%.

Ao se comparar os resultados obtidos no experimento realizado com dados encontrados na literatura, percebe-se a eficiência dos metais encontrados. A tabela abaixo mostra as quantidades médias dos metais mais comuns presentes em PCI, obtidas por diversos autores (Goosey, 2003; Yamane, 2011).

Gráfico 4 – Quantidades médias dos metais mais comuns presentes em PCI, obtidas por diversos autores



Fonte: Goosey (2003); Yamane (2011)

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Caracterização e quantificação dos REEE da UFRN

#### 4.1.1 *Departamento de Materiais e Patrimônio (DMP)*

Para avaliação da quantificação e caracterização do lixo eletrônico gerado na UFRN, fez-se necessário uma visita ao setor responsável, o Departamento de Material e Patrimônio (DMP). Em reunião com a gestora da repartição administrativa, Adriane Tramontin, inúmeras perguntas foram realizadas buscando informações para embasar a pesquisa. Para melhor esclarecimento e concretização das respostas, outros dados foram levantados como relatórios e arquivos a respeito de compras, produtos e alienações feitas pelo DMP e pela Comissão para Avaliação de Alienação de Material Permanente que ocorre cerca de duas vezes por ano.

Figura 9 – Fachada do DMP



Fonte: Batista (2018)

O processo de venda desempenhado pela UFRN deve seguir a Lei 9373 de 11 de Maio de 2018 que dispõe sobre a alienação, a cessão, a transferência, a destinação e a disposição

final ambientalmente adequada de bens móveis no âmbito da administração pública federal direta, autárquica e fundacional. Segundo artigo 9º presente nessa mesma lei, os alienatários e beneficiários da transferência se responsabilizarão pela destinação final ambientalmente adequada dos bens móveis inservíveis.

Assim, para as empresas alienatárias os padrões a serem cumpridos pela legislação deve seguir a Lei 12.305 de 02 de Agosto de 2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, dispondo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduo sólido, incluído os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis.

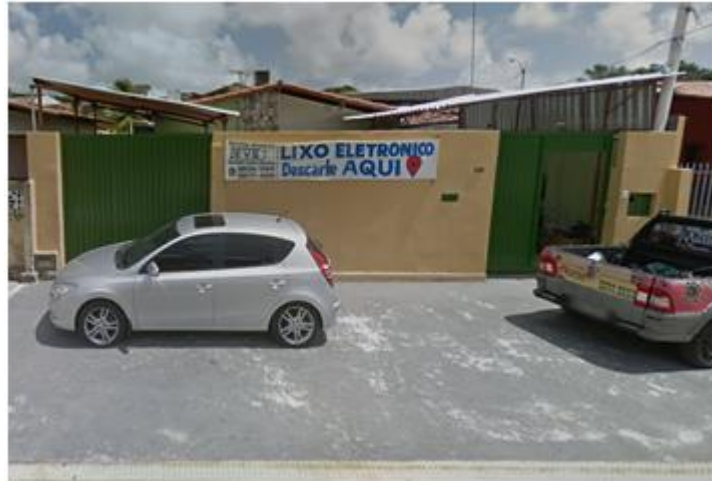
#### ***4.1.2 EVS Reciclagem Digital***

Como já mencionado, a empresa alienatária deve obedecer a Lei 12.305 de 02 de Agosto de 2010 que institui a aplicação aos resíduos sólidos, além do disposto nas Leis 11.445 de 05 de janeiro de 2007, 9.974 de 06 de junho de 2000, e 9.966 de 28 de abril de 2000, as normas estabelecidas pelos órgãos do Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama), do Sistema Nacional de Vigilância Sanitária (SNVS), do Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária (Suasa) e do Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Sinmetro).

Uma das empresas alienatárias da UFRN é a EVS Reciclagem Digital e Informática que tem como atividade secundária a coleta de resíduos não perigosos, a reparação e manutenção de computadores e de equipamentos periféricos e o suporte técnico, manutenção e outros serviços em tecnologia da informação.



Figura 10 – Fachada da EVS Lagoa Nova



Fonte: Batista (2018)

Durante uma reunião com Edivane Souza, contadora e visionária da EVS, foi nos mostrado como é realizado o trabalho da equipe, o recolhimento dos materiais, os fornecedores, os compradores, o destino final da matéria comprada entre outros. Não só a parte técnica e burocrática da organização, mas também todo o projeto social que o acompanha.

#### **4.1.3 LAMNRC**

O grupo de trabalho do Laboratório de Laboratório de Materiais Nanoestruturados e Reatores Catalíticos (LAMNRC), coordenado pelo professor Carlson Pereira, vêm dedicando-se com a temática da reciclagem e processamento de PCI de computadores desktops obsoletos da UFRN desde o ano de 2008. Todavia, os avanços dos trabalhos do LAMNRC apenas se intensificaram e se tornaram contínuos a partir do ano de 2013 quando a temática começou a ser explorada pela aluna Natália Medeiros da pós-graduação.

Durante esse tempo houve a participação de diferentes docentes e servidores, porém atualmente o mesmo vem sendo coordenado pelo professor Carlson Pereira em parceria com o professor André Moriyama. Muitos alunos de graduação, mestrado e doutorado já atuaram

no presente projeto de pesquisa/extensão tanto como bolsistas quanto voluntários, colaborando assim para desenvolvimento acadêmico de muitos discentes em diferentes níveis de ensino.

## **4.2 Caracterização e quantificação das PCI da UFRN**

### **4.2.1 Composição e Componentes das PCI**

Para caracterização das PCI, é necessário conhecer sua massa, área e volume correspondente. Assim, vinte e cinco placas de circuito foram analisadas com e sem componentes a fim de se obter a massa média dos componentes e do substrato.

Em Conjunto com a empresa EVS Reciclagem e a pesquisa de Melo (2017) determinou-se uma média referente á massa do substrato, dos componentes e o volume ocupado pela placa.

## **4.3 Projeto preliminar para processamento de PCI da UFRN**

O processo que vem a ser abordado neste trabalho é o hidrometalúrgico realizado no LAMNRC da UFRN. A base da pesquisa se iniciou em 2013 e vem sendo estudada ainda nos dias de hoje sendo a mais recente coordenada por Raffael Melo junto com os professores Carlson Pereira e André Moriyama.

Visando atingir a demanda de reciclagem de placas de circuito impresso de computadores desktops obsoletos da UFRN, tem-se a ideia de ampliar o modelo já estudado experimentalmente. Ao projetá-lo em uma escala piloto conseguiríamos recuperar esses metais e reutilizar os polímeros, sensibilizando futuras comunidades acadêmicas da UFRN e até mesmo garantir uma maior valorização para futuras alienações empregadas pela comissão responsável.

Como já revisado anteriormente, o método é feito de modo físico e químico com variação de alguns parâmetros (solução ácida, temperatura, concentração). Para o projeto,

utilizou-se apenas os parâmetros do ensaio quatro com água régia diluída o qual se mostrou mais eficiente.

Nesta etapa, foi necessário unir as informações levantadas dos quantitativos de computadores e placas obtidas no DMP e na EVS para assim obter uma base de cálculo para o projeto a ser realizado na instituição. Também foram arrecadadas informações da pesquisa realizada por Raffael Melo a respeito do quantitativo de matérias metálicos, poliméricos e cerâmicos estimados nas PCI de seu estudo em 2017.

Para a rota preliminar de processamento utilizou-se de equipamentos e operações unitárias simples e já conhecidas de modo a minimizar as perdas do processo mecânico, garantir a eficiência da lixiviação e proporcionar uma fração sólida com menor teor possível de umidade.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Caracterização e quantificação dos REEE da UFRN

#### 5.1.1 *Departamento de Materiais e Patrimônio (DMP)*

Os equipamentos para descarte e conseqüentemente alienação são amontoadas todos juntos, não havendo uma separação correta entre esses pertences, como por exemplo, uma separação simples do que é mesa, cadeira, material de informática, aparelho telefônico, equipamento de uso laboratorial, etc. Além disso, esses equipamentos vão sendo arrecadados ao longo do semestre e acabam por ficar expostos de maneira inapropriada. A figura abaixo mostra a forma no qual os equipamentos ficaram dispostos em 2010, visto que durante a realização deste presente trabalho já havia ocorrido o processo de alienação.

Figura 11 – Amontoados do DMP (2010)



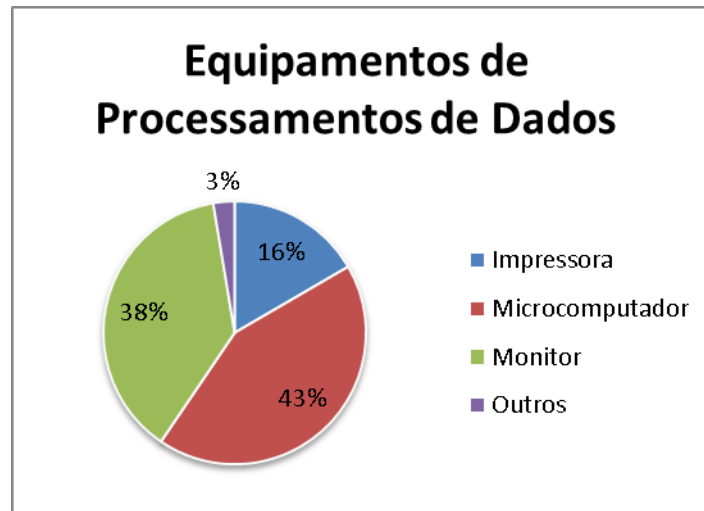
Fonte: SIGAA (2018)

Como possuem elevada toxicidade (chumbo, mercúrio, bromo), podem causar danos para o ambiente e para o ser humano. Todo esse amontoado é alienado de forma única por um valor de lote fixo estabelecido pela comissão responsável. Estando os bens dispostos dessa maneira, além da própria depreciação do equipamento com o tempo há a desvalorização dos itens de forma individual, fazendo com que qualquer objeto possua o mesmo valor.

A última alienação realizada pela comissão ocorreu em 03 de Agosto de 2018 no qual 15.892 bens em geral foram recolhidos durante um ano e meio e vendido por um lote fixo de

R\$ 13.000,00. Dessa quantidade total de bens apanhados, 2.261 são de equipamentos de processamentos de dados, e dentre esses, aproximadamente 960 são de microcomputadores e de todas as unidades gestoras presentes no Campus, que sofreram uma depreciação total de R\$ -1.117.232,70. Se avaliarmos o total de bens pelo valor vendido, observamos que cada equipamento saiu por aproximadamente R\$0,82. Ou seja, totalmente desvalorizado.

Gráfico 5 – Equipamentos de Processamento de Dados



Fonte: Batista (2018)

Há maneiras para se reduzir esse baixo valor monetário atribuído, uma delas é fazer uma separação simples dos aparatos recolhidos e tratá-los da melhor maneira possível. O equipamento de interesse desse trabalho são as placas de circuito impresso dos computadores obsoletos gerados. Nessas PCI são encontrados inúmeros metais de alto valor assim como matérias poliméricas e cerâmicas que podem ser reutilizados de diversas formas. Esse valor econômico dos metais preciosos existentes é, de fato, uma das forças motrizes para o desenvolvimento de um sistema de valorização e recuperação destes REEE (Abrantes, 2009; Hagelüken, 2006).

A valorização dessas placas torna-as num recurso secundário, podendo permitir a recuperação, reutilização e reciclagem de metais e não metais nelas contidas, contribuindo-se assim para a redução de custos associados à obtenção destes recursos e à diminuição do impacto destes resíduos no ambiente (Abrantes, 2009; Tuncuk, 2012).

Os polímeros e cerâmicas também possuem uma alta participação no mercado, pois há inúmeras formas de reutilizá-lo ao usá-lo como matéria secundária já tratada e diminuir assim a quantidade de matéria prima retirada. Devido suas propriedades mecânicas, térmicas, óticas

e de resistência a intempéries e ações químicas, são utilizados em instalações hidráulicas prediais de água, esgoto sanitário e outros; em instalações elétricas nos eletrodutos para a passagem de fios e cabos; em fechamento de fachadas e cobertura; pisos, revestimentos e forros; tintas e vernizes protegendo e melhorando a superfície (Hipolito et al. 2013).

Ao tratá-lo, diminuiríamos a desvalorização desses equipamentos e garantiríamos a ecoeficiência, mediante a compatibilização entre o fornecimento, a preços competitivos, de bens e serviços qualificados que satisfaçam as necessidades humanas e tragam qualidade de vida e a redução do impacto ambiental e do consumo de recursos naturais a um nível, no mínimo, equivalente à capacidade de sustentação estimada do planeta prevista no inciso I do artigo 2º da Lei 9373 de 11 de Maio de 2018.

### 5.1.2 *EVS Reciclagem Digital*

O produto de maior interesse da empresa são os equipamentos eletroeletrônicos, computadores, notebooks, televisores, celulares, impressoras. Outros materiais recebem destinos diferentes, como por exemplo, os ar-condicionares que são vendidos á empresas parceira que trabalha com esse tipo de eletrônico, garantindo também a destinação final adequada.

Figura 12 – Amontoados da EVS Reciclagem



Fonte: Batista (2018)

Os computadores que podem ser consertados são levados à assistência técnica para reparo e doado para algumas de suas parcerias sociais. Dos computadores totalmente obsoletos que chegam, eles separam fonte, HD, carcaça (plástico), placa de circuito, nobreaks de cobre e alumínio, etc. Todos esses materiais são classificados e descaracterizados, como exemplo o HD que é feito um furo rompendo a passagem e uso de qualquer informação. As placas de circuito são separadas em placas ricas (computadores, celulares) e pobres (televisores), e enfardadas em sacos de rafia de diferentes volumes.

Figura 13 – Amontoado das PCI da EVS Reciclagem



Fonte: Batista (2018)

O modo como é feita essa caracterização das placas dependerá da exigência da empresa parceira compradora, ou seja, a empresa maior que recebe das “microempresas” e exportam. A EVS, nessa situação, recolhe esses materiais do Estado e de alguns outros próximos e realiza um tratamento prévio bruto para assim realizar as parcerias com a Sar do Brasil, Hamaya do Brasil, Gerdal, Ecovt Ind. e Com. de Reciclagem LTDA – EPP, V.A. Reciclagem e Lorene. Essas empresas recebem esse material em grande quantidade, conseguindo colocar em containers de 40 toneladas e exportar, já a EVS consegue juntar e enviar o equivalente a 95,7 toneladas durante um período de oito meses, dividido em sucata eletrônica, metálica, tubo CRT e plástico repartido para cada empresa de acordo com seu resíduo de interesse.



Tabela 7 – Venda dos REEE da EVS

<b>Empresa</b>	<b>Quantidade (kg)</b>	<b>Tipo de material</b>
LORENE	14.596,86	Sucata Eletrônica
SAR DO BRASIL	10.563,00	Sucata Eletrônica
HAMAYA DO BRASIL	2.400,00	Sucata Eletrônica
GERDAL	40.400,00	Sucata Metálica
ECOVIT IND. E COM. DE RECICGALÉM LTDA - EPP	14.740,00	Sucata Tubo CRT
V.A RECICLAGEM	13.000,00	Sucata de Plástico
<b>Total</b>	<b>95.699,86</b>	-

Fonte: EVS Reciclagem (2018)

A maioria desses resíduos são exportados para a Holanda, Inglaterra, Japão e outros. Segundo a empresária da EVS, na indústria na Holanda, onde a própria já visitou, é realizado o processo pirometalúrgico onde o produto de interesse é a grande quantidade de energia gerada que é transformada em fonte de calor.

“Não tenho visão só de lucro, mas também ambiental e social” foi uma das frases dita pela visionária da EVS a qual nos falou de seus projetos sociais que começou muito antes da empresa ser legalizada. Alguns do projeto dela ocorreu com carroceiros, onde ela ensinava-os a reciclar e caracterizar o plástico, fazendo aumentar a renda de base deles de R\$ 0,05 para R\$ 0,45. Além disso, cada 1 kg de lixo eletrônico coletado, R\$0,25 é doado para Associação Amigos do Coração da Criança – AMICO.

### 5.1.3 LAMNRC

O grupo de trabalho vem explorando a temática á nível de pesquisa e extensão, onde ao longo dos anos o foco tem sido o processamento das PCI para recuperação e purificação dos diferentes metais, onde diferentes projetos de pesquisa e extensão foram cadastrados, aprovados e executados pelos colaboradores do LAMNRC da UFRN.

A seguir alguns resultados alcançados pelo grupo são listados:

- Em 2014 a 1ª monografia (graduação) do LAMNRC sobre a temática é apresentada (Raffael Andrade Costa de Melo);



- Em 2015 a 1ª dissertação (mestrado) do LAMNRC sobre a temática é apresentada (Natália Moraes Medeiros);
- Em 2016 a 2ª dissertação (mestrado) do LAMNRC sobre a temática é apresentada (Raffael Andrade Costa de Melo);
- Em 2017 a 2ª monografia (graduação) do LAMNRC sobre a temática é apresentada (Arthur Mendes Mariano Gomes).

A participação do professor André Moryama como orientador foi de suma importância para o desenvolvimento e conquistas alcançadas pela equipe do LAMNRC, como mostrado abaixo.

- Em 2018 a 1ª tese de doutorado do LAMNRC sobre a temática é apresentada por Maria do Socorro Bezerra da Silva;
- Entre 2013 e 2018 foram apresentados e publicados em anais de congressos e eventos acadêmicos nove trabalhos científicos (postes, resumos e trabalhos completos);
- Em 2017 foram ministrados três minicursos em eventos acadêmicos tratando da temática ou assuntos correlatos;
- Em 2014 o projeto de pesquisa foi premiado com menção honrosa durante o XXV CICT da UFRN.

Entre 2013 a 2018 foram contabilizadas ao todo a participação de 13 alunos de graduação da engenharia química (DEQ) atuando diretamente pelo LAMNRC em projetos de pesquisa/extensão, coordenados pelos professores Carlson e André, demonstrando assim a capilaridade da temática para promover a inserção de alunos de graduação nas atividades de iniciação científica e tecnológica.

A lista dos projetos de pesquisa e extensão (nomes, datas, etc.) executados ou em execução por colaboradores do LAMNRC (coordenados pelo professor Carlson ou por outros professores parceiros associados á Carlson) podem ser visualizadas via SIGAA por qualquer aluno da UFRN.

## 5.2 Caracterização e quantificação das PCI da UFRN

### 5.2.1 Componentes e composição das PCI

As PCI recolhidas pertenciam as marcas Lenovo, hp, Asus, Positivo, Dell e Itaotec. As placas com componentes foram analisadas em conjunto com a EVS Reciclagem, que se disponibilizou para tal análise. Os dados levantados estão representados nas tabelas abaixo.

Tabela 8 – Caracterização das PCI com componentes

PCI	Área (cm <sup>2</sup> )	Volume (cm <sup>3</sup> )	Massa (kg)	Densidade (kg/cm <sup>3</sup> )
Placa 1	486,00	68,04	0,464	0,006820
Placa 2	414,80	58,07	0,464	0,007990
Placa 3	379,10	151,64	0,418	0,002757
Placa 4	384,20	53,79	0,372	0,006916
Placa 5	466,04	65,25	0,500	0,007663
Placa 6	382,50	53,55	0,374	0,006984
Placa 7	486,00	68,04	0,462	0,006790
Placa 8	588,04	81,15	0,530	0,006531
Placa 9	482,00	66,52	0,502	0,007547
Placa 10	595,36	82,16	0,634	0,007717
Placa 11	492,88	69,00	0,538	0,007797
Placa 12	539,46	75,52	0,568	0,007521
Placa 13	525,38	72,50	0,484	0,006676
Placa 14	476,74	66,74	0,494	0,007401
Placa 15	474,77	66,47	0,484	0,007282
Placa 16	445,85	62,42	0,494	0,007914
Placa 17	380,80	53,31	0,290	0,005440
Placa 18	592,90	83,01	0,570	0,006867
Placa 19	482,40	66,57	0,514	0,007721
Placa 20	606,00	84,84	0,538	0,006341
Placa 21	492,00	67,90	0,444	0,006539

Placa 22	577,92	80,91	0,534	0,006600
Placa 23	484,00	66,79	0,470	0,007037
Placa 24	539,84	75,58	0,518	0,006854
Placa 25	498,15	69,74	0,528	0,007571
<b>Média</b>	<b>490,93</b>	<b>72,38</b>	<b>0,488</b>	<b>0,006931</b>

Fonte: Batista (2018)

As PCI sem os componentes eletrônicos foram analisadas a partir dos substratos já adquiridos dos trabalhos realizados no LAMNRC ao longo do tempo. Esses substratos possuíam apenas os componentes soldados, já os coolers, baterias, processadores e outros foram retirados. Os dados estão representados na tabela abaixo.

Tabela 9 – Caracterização das PCI sem os componentes

PCI	Área (cm <sup>2</sup> )	Volume (cm <sup>3</sup> )	Massa (kg)	Densidade (kg/cm <sup>3</sup> )
Placa 1	738,10	103,33	0,285	0,002757
Placa 2	661,50	92,61	0,177	0,001909
Placa 3	466,04	65,25	0,217	0,003324
Placa 4	595,36	83,35	0,250	0,002997
Placa 5	674,05	94,37	0,250	0,002647
Placa 6	595,36	83,35	0,212	0,002542
Placa 7	592,92	83,01	0,213	0,002570
Placa 8	512,40	71,74	0,197	0,002741
Placa 9	470,92	65,93	0,177	0,002688
Placa 10	485,56	67,98	0,181	0,002663
Placa 11	597,80	83,69	0,210	0,002509
Placa 12	387,60	54,26	0,162	0,002985
Placa 13	744,20	104,19	0,284	0,002725
Placa 14	595,36	83,35	0,222	0,002662
Placa 15	704,88	98,68	0,249	0,002520
Placa 16	566,04	79,25	0,205	0,002587
Placa 17	566,04	79,25	0,213	0,002692
Placa 18	488,00	68,32	0,176	0,002576
Placa 19	591,70	82,84	0,218	0,002636

Placa 20	393,72	55,12	0,167	0,003035
Placa 21	671,00	93,94	0,244	0,002596
Placa 22	651,48	91,21	0,234	0,002568
Placa 23	591,70	82,84	0,217	0,002623
Placa 24	536,80	75,15	0,196	0,002612
Placa 25	671,00	93,94	0,253	0,002692
<b>Média</b>	<b>581,98</b>	<b>81,48</b>	<b>0,216</b>	<b>0,002674</b>

Fonte: Batista (2018)

O levantamento desses dados possibilitou estimar a massa das PCI produzidas pela UFRN, e assim estimar o volume necessário do tanque de acordo com a massa ocupada. Estimou-se também a massa média de um substrato para todos os cálculos da rota de processamento.

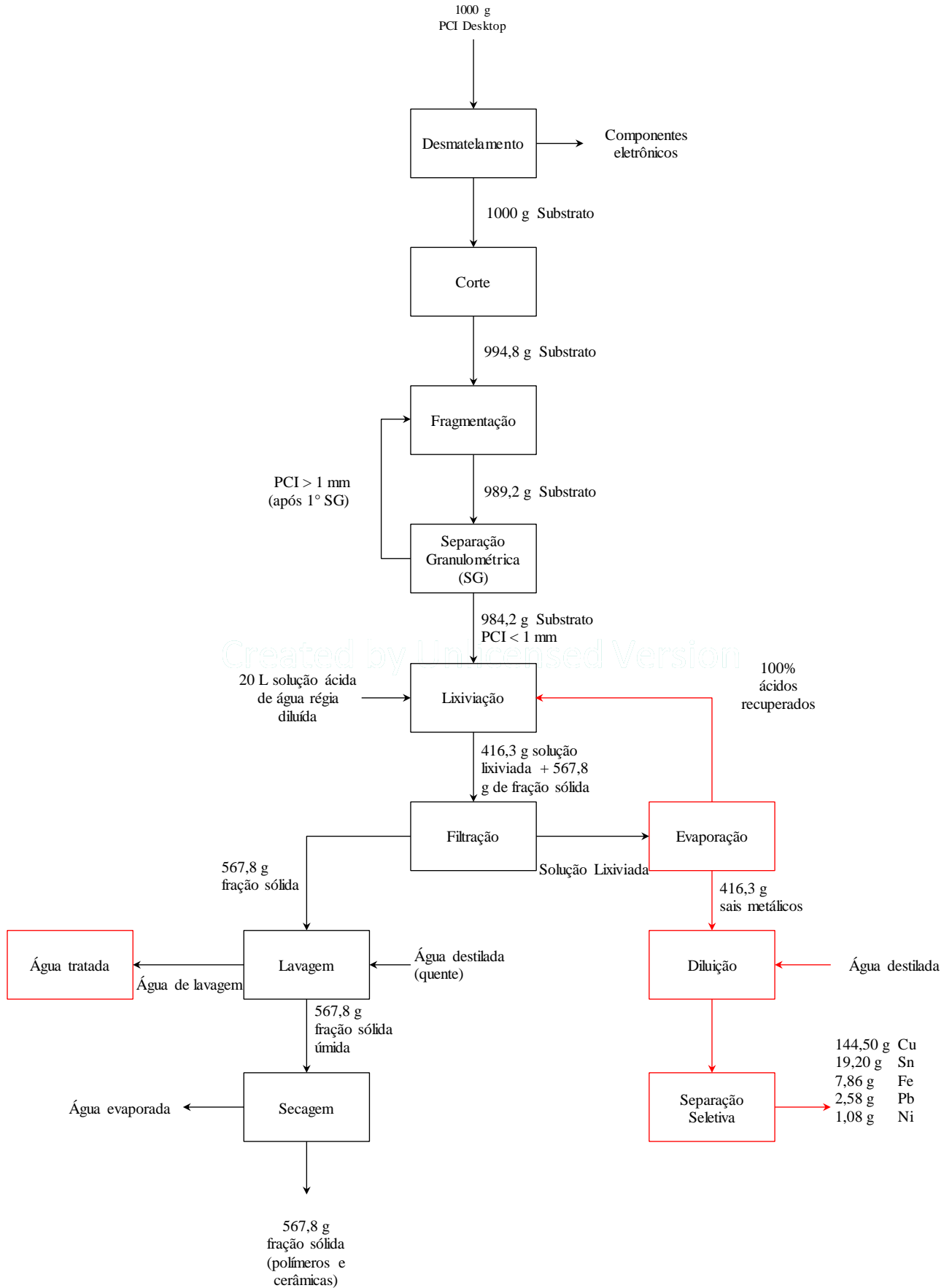
Desse modo, a massa média do substrato é de 0,216 kg onde apenas os componentes pesam em média 0,272 kg. O volume do substrato e sua densidade foram utilizados mais á frente para estimativa de volume do reator, sendo 81,48 cm<sup>3</sup> e 0,002674 kg/cm<sup>3</sup>, respectivamente.

### 5.3 Projeto para processamento de PCI da UFRN

Para base de cálculo mostrada na tabela abaixo, foi necessário unir o método de tratamento para lixiviação de acordo com a Tabela 5 da matriz de planejamento experimental, assim como as informações quantitativas de PCI da UFRN onde amontou-se cerca de 960 computadores ao longo de um ano e meio, tornando possível calcular a massa de PCI, o volume de ácido e água, a fração mássica passível de ser recuperada de metais e não metais ao longo do processo.

O diagrama representado abaixo apresenta não somente as etapas do processo como também o fluxo de massa partindo de uma base de cálculo de 1000 g de PCI, considerando perda e eficiência. A massa dos produtos finais partiram da porcentagem da lixiviação de acordo com a análise de FRX das escórias lixiviada por Melo (2017) da Tabela 6.

Figura 14 – Diagrama de Blocos

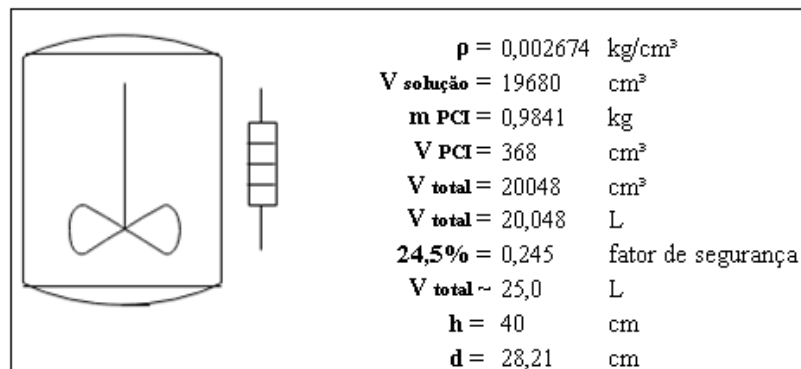


Fonte: BATISTA, 2018

Partindo de 1000g de substrato dá-se início aos processos mecânicos começando com o corte na guilhotina tesourão, seguido do moinho de facas e uma separação granulométrica. Manteve-se a porcentagem de perdas trabalhadas experimentalmente como mostrado na Tabela 4 de Perdas de massa por etapa no processamento mecânico: 0,52% na primeira moagem; 0,56% na segunda moagem; 0,51% na classificação granulométrica.

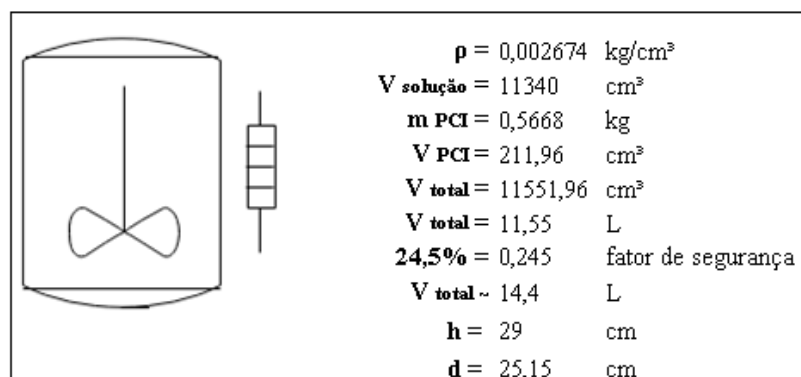
A eficiência da lixiviação se manteve como mostrado na Tabela 5 da Matriz do planejamento experimental para água régia diluída (42,3%), no qual a parte não lixiviada se deve aos materiais não passíveis a solubilização (polímeros e cerâmicas). Esse processo ocorre em um tanque de mistura com aquecimento elétrico. A esse tanque é acoplado um condensador com intuito de controlar os gases evaporados tanto para aproveitamento energético quanto pra não liberação dessas substâncias tóxicas para atmosfera. De acordo com o volume de solução ácida necessária e densidade da PCI, é possível dimensionar o volume do tanque. O fator de segurança proposto foi de 25% para suportar os vapores gerados e o volume da hélice de agitação.

Figura 15 – Dimensões do tanque (base de cálculo)



Fonte: Batista (2018)

Figura 16 – Dimensões do tanque (diário)



Fonte: Batista (2018)

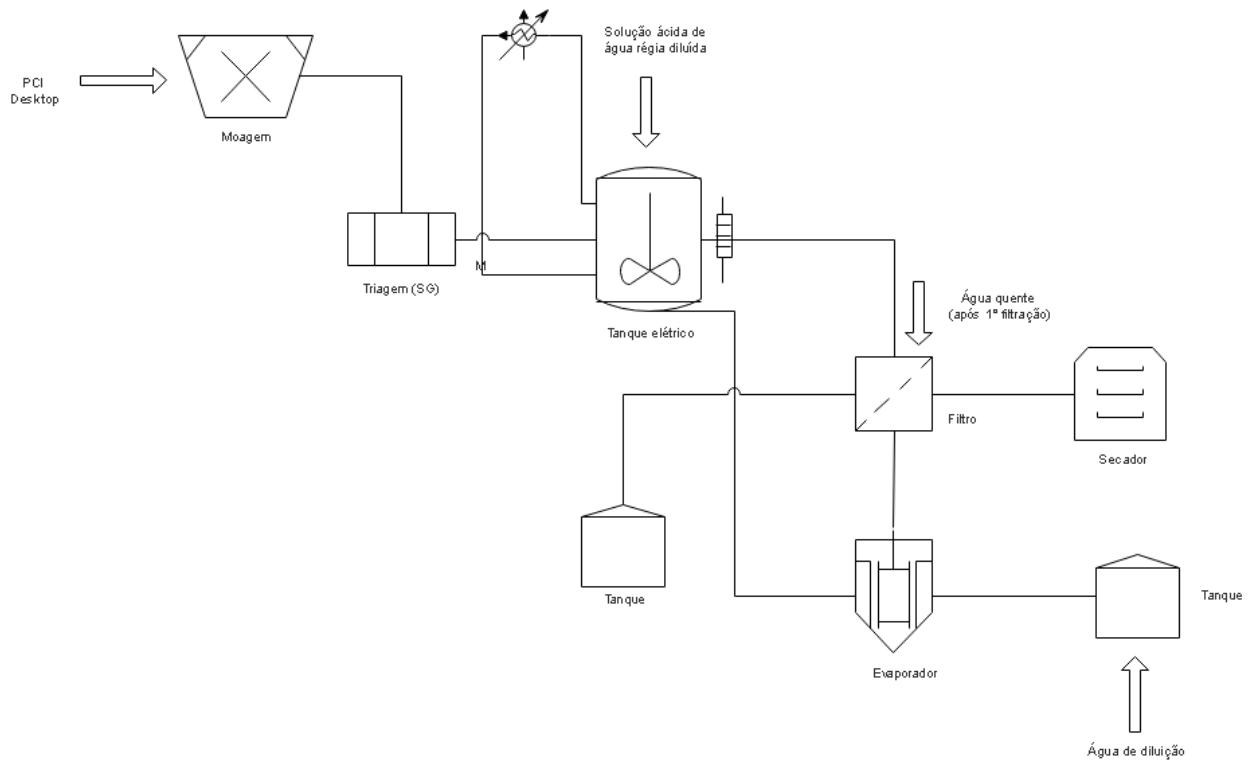
Após a solubilização uma etapa de filtração é necessária para separar as duas fases formadas, fazendo uso de um filtro prensa, produzindo uma torta seca e de fácil manuseio. No primeiro momento ocorre a separação do lixiviado e do sobrenadante, sendo este lavado para retirar qualquer resíduo metálico passando por um processo de lavagem á quente. Para evaporação dessa umidade presente residual, a fração não solubilizada é levada para secagem ao ar livre, visando uma maior economia. Essa água é aquecida através de uma resistência e levada para o processo de lavagem. Já a parte líquida é armazenada para futura purificação. Todo o sistema é feito em batelada.

Os blocos representados em vermelho não foram submetidos á estudos laboratoriais, são sugestões de tratamentos que demandam outros estudos. Para a estimativa final da quantificação de metais recuperados, desconsiderou-se qualquer perda durante o processo de recuperação dos ácidos e uma eficiência de 100% nos processos específicos de purificação para recuperação dos metais.

A água de lavagem contém sais residuais metálicas que podem ser tratados através de um processo de eletrocoagulação, floculação ou decantação, os quais possuem grande eficiência no tratamento, fazendo-a retornar para o sistema. Os processos seletivos se baseiam na extração por um solvente específico para cada metal de interesse.

O flowsheet representado abaixo simplifica a rota de processamento para uma melhor visualização, obedecendo a mesma ordem de processamento: moagem; triagem; lixiviação; condensação; filtração; evaporação; secagem; tratamento; diluição.

Figura 17 – Flowsheet



Fonte: Batista (2018)

Outras soluções podem ser estudadas a partir do mesmo processo (flowsheet), ou seja, podem ser simuladas diversas metodologias nesta mesma planta, uma vez que a base do processo hidrometalúrgico é o mesmo mostrado acima.

### 5.3.1 Engenharia Verde

Um dos modos de reduzir o impacto negativo gerado ao meio ambiente é realizar medidas ambientalmente corretas associadas à transformação e reciclagem da matéria, seja ela de curto, médio ou longo prazo. Dessa forma é possível diminuir a quantidade de recursos naturais a serem extraídos assim como os riscos para a saúde humana, promovendo o desenvolvimento sustentável.



A engenharia verde se tratando dos resíduos sólidos também é responsabilidade do direito público uma vez que são geradores de REEE por meio de seu consumo. Assim é de suma importância que a própria Universidade realize ações em busca de solucionar o problema gerado, compartilhando o ciclo de vida do produto, tanto na dimensão política, econômica, ambiental, cultural e social.

Segundo a Lei 12.305/2010 é objetivo da Política Nacional de Resíduos Sólidos o incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos. Assim como a cooperação técnica e financeira entre os setores público e privado para o desenvolvimento de pesquisas e métodos de reciclagem, reutilização, tratamento e disposição final ambientalmente adequada desses rejeitos.

Quando a PCI é tratada ela é transformada em recursos secundários podendo permitir a recuperação, reutilização e reciclagem de metais e não metais nelas contidas, contribuindo-se assim para a redução de custos associados à obtenção destes recursos e à diminuição do impacto destes resíduos no ambiente (Abrantes, 2009; Tuncuk, 2012). Em primeira instância, a parte não lixiviada pode virar matéria no âmbito da engenharia de materiais, civil e elétrica como já mencionada anteriormente sobre as funcionalidades dos materiais poliméricos e cerâmicos.

A parte lixiviada foi purificada aumentando seu valor agregado ao comparar com seu estado inicial, assim serve de objeto de estudo para a comunidade acadêmica desenvolver meios alternativos de não extrair a matéria direta da natureza, e sim reutilizar e transformar em um novo produto ao realizar a separação específica dos metais. Assim como valorizar sua alienação.

Se a UFRN tem a responsabilidade sob seus REEE e tem capacidade de tratá-la, não há porque repassar para outro mercado por um valor tão baixo e desvalorizar toda e qualquer pesquisa de desenvolvimento sustentável e econômico que vêm a surgir através desse problema a curto, médio ou longo prazo.

### 5.3.2 Análise Econômica

Partindo de uma análise econômica simples, estudou-se o quanto seria gasto com materiais primários e o quanto supostamente seria gerado por meios das considerações realizadas anteriormente. Partiu-se da quantificação de placa, solução, água, tempo e investimento econômico para estimar um total de metais passíveis a serem recuperados.

A análise econômica engloba todos os aspectos levantados durante o trabalho: quantidade de PCI arrecadada; valor ganho pela UFRN durante o processo de alienação; cotação média dos metais industriais presentes nas PCI; massa de metais passíveis de serem recuperados; quantificação e cotação dos materiais a serem utilizados no tratamento.

A tabela abaixo mostra a quantificação de soluções ácidas empregadas para tratamento de certas quantidades de placas no decorrer do ano após as perdas durante os processos mecânicos considerados (1,59%).

Tabela 10 – Quantificação das PCI

Placa tratada por tempo	PCI	Dia	Mês	Ano	Base de cálculo
<b>Quantidade de placa</b>	1	2,67	106,67	640	4,8
<b>Massa (g) (216 g /placa)</b>	216	576	23040	138240	1000
<b>Massa (g) (após perdas)</b>	212,6	566,8	22673,7	136042	984,1
<b>HNO<sub>3</sub> (L)</b>	0,18	0,47	18,93	113,6	0,82
<b>HCl (L)</b>	0,39	1,05	42,04	252,22	1,82
<b>Água destilada (L)</b>	3,68	9,81	392,5	2355,02	17,04

Fonte: BATISTA, 2018

Para analisar os materiais a serem contabilizados como custo, considerou-se que os equipamentos para realização da rota de processamento já residem como patrimônio adquirido pela Universidade e que o sistema de destilação de água já é produzido diariamente no laboratório do Nupeg II não sendo contabilizando, entrando no cálculo apenas a quantidade a

ser utilizada de ácido. Como a recuperação dos ácidos está considerada com 100% de eficiência, o custo associado às soluções utilizadas seriam orçados apenas uma vez, ou seja, apenas para um dia de tratamento. Custos com recursos humanos não foram contabilizados.

Tabela 11 – Custos Associados

<b>Material</b>	<b>(L)</b>	<b>R\$ / L</b>	<b>Custo total</b>	
HNO <sub>3</sub> (60-70%)	0,47	R\$ 72,00	R\$	33,84
HCl (36-38%)	1,05	R\$ 34,00	R\$	35,70
<b>Total</b>			<b>R\$</b>	<b>69,54</b>

Fonte: Quimlab (2018); Solulab (2018)

Para quantificar a massa correspondente recuperada dos metais individualmente, um balanço simples foi realizado a partir da Tabela 6 da composição das escórias lixiviadas e analisadas por FRX. A quantificação de massa recuperada a partir da base de cálculo é mostrada na Tabela 12 abaixo analisando a massa do lixiviado e a massa antes da reação, 948,2 g e 416,3 g, respectivamente. A Tabela 13 analisa a massa recuperada de metais em dia de reação analisando as 576 g de substrato inicial e 239 g após lixiviados.

Tabela 12 – Quantificação de metais recuperados / base de cálculo

<b>Componentes</b>	<b>% Inicial</b>	<b>% Final</b>	<b>Massa inicial (g)</b>	<b>Massa final (g)</b>	<b>Massa recuperada (g)</b>
Cu	36,9	2,19	153,61	9,12	144,50
Sn	5,1	0,5	21,23	2,08	19,15
Fe	2,04	0,15	8,49	0,62	7,87
Pb	0,68	0,06	2,83	0,25	2,58
Ni	0,28	0,02	1,17	0,08	1,08

Fonte: Batista (2018)

Tabela 13 – Quantificação de metais recuperados / dia

Componentes	% Inicial	% Final	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa recuperada (g)
Cu	36,9	2,19	88,48	5,25	83,23
Sn	5,1	0,5	12,23	1,20	11,03
Fe	2,04	0,15	4,89	0,36	4,53
Pb	0,68	0,06	1,63	0,14	1,49
Ni	0,28	0,02	0,67	0,05	0,62

Fonte: Batista (2018)

A tabela abaixo avalia a cotação de alguns metais, analisando o total recuperado por dia de tratamento preliminar.

Tabela 14 – Cotação dos metais recuperados por dia

Componentes	Massa recuperada (kg)	R\$/kg	R\$/ kg recuperado
Cu	0,08323	R\$ 25,3773	R\$ 2,1122
Sn	0,01103	R\$ 79,2372	R\$ 0,8740
Fe*	0,00453	R\$ 0,2745	R\$ 0,0012
Pb	0,00149	R\$ 7,9713	R\$ 0,0119
Ni	0,00062	R\$ 47,6038	R\$ 0,0295
<b>Total</b>			<b>R\$ 3,03</b>

\* Minério de Ferro

Fonte: Alumasa (2018); Ycharts (2018)

As equações abaixo mostram o possível lucro por dia, subtraindo do valor de saída (custos com solução ácida), e o tempo necessário para cobrir os custos e passar a se obter apenas valores positivos

$$L = 3,03 - 69,54$$

$$L = R\$ - 66,51$$

$$L = 69,54 / 3,03$$

$$L = 22,9 \text{ meses}$$

Considerando que a recuperação dos ácidos se dá com 100% de eficiência, o custo seria contabilizado somente no início do projeto, havendo lucro apenas a longo prazo, sendo necessário aproximadamente dois anos de tratamento para cobrir os custos com o próprio valor arrecadado e passar a ter o lucro total de R\$ 727,20 por ano, contabilizando que há em média 240 dias úteis por ano.

O custo e cotação por placa é representado nas tabelas abaixo para análise de comparação em ganho por alienação e por tratamento.

Tabela 15 – Custos Associados/PCI

<b>Material</b>	<b>(L)</b>	<b>R\$ / L</b>	<b>Custo total</b>	
HNO3 (60-70%)	0,18	R\$ 72,00	R\$	12,96
HCl (36-38%)	0,39	R\$ 34,00	R\$	13,26
<b>Total</b>			<b>R\$</b>	<b>26,22</b>

Fonte: Quimlab (2018); Solulab (2018)

Tabela 16 – Cotação dos metais (PCI)

<b>Componentes</b>	<b>Massa recuperada (kg)</b>	<b>R\$/kg</b>	<b>R\$/ kg recuperado</b>	
Cu	0,0312	R\$	25,38	R\$ 0,7920
Sn	0,0041	R\$	79,24	R\$ 0,3280
Fe*	0,0017	R\$	0,27	R\$ 0,0005
Pb	0,0006	R\$	7,97	R\$ 0,0045
Ni	0,0002	R\$	47,60	R\$ 0,0109
<b>Total</b>			<b>R\$</b>	<b>1,14</b>

\* Minério de Ferro

Fonte: Alumasa (2018); Ycharts (2018)

Tabela 17 – Comparação de processo por Computador/PCI

<b>Processo</b>	<b>Valor de Entrada</b>		<b>Valor de Saída</b>		<b>Lucro Imediato</b>		<b>Lucro á longo prazo</b>	
<b>Alienar</b>	R\$	0,82	-		R\$	0,82	R\$	0,82
<b>Tratar</b>	R\$	1,14	26,22		<b>-R\$</b>	<b>25,08</b>	R\$	1,14

Fonte: Batista (2018)

Ao analisar a Tabela 11 de custos associados nota-se que a quantidade utilizada de ácido em uma dia de reação é muito baixa, em torno de 500 mL de HNO<sub>3</sub> e 1000 mL de HCl. Se considerarmos que esses frascos já pertencem ao LAMNRC em grandes quantidades, descartaríamos os custos associados á esse processo, uma vez que teoricamente há 100 % de eficiência na recuperação dos ácidos, voltando para o processo continuamente. Assim, o lucro seria 1,4 vezes maior que aliená-lo.

## 6 CONCLUSÃO

O presente trabalho se mostrou eficiente á longo prazo devido aos custos imediatos associados ás soluções ácidas. Esses custos podem ser contornados ao desconsiderá-los, visto que o laboratório já possui essas soluções em grande quantidade, e na maioria das vezes acaba passando do prazo de validade por pouca quantia usada perante a equipe. Além disso, tratando-se de um projeto preliminar para atender tal demanda de reciclagem da UFRN, a quantidade utilizada é mínima, com reaproveitamento teórico de 100% tanto dos ácidos quanto da água destilada.

A contrariedade com o comparativo da alienação se dá no baixo valor agregado no qual a UFRN vende seus materiais obsoletos. É um valor tão minimamente representativo que torna quase impossível de se competir com qualquer tratamento que favoreça o ciclo de vida do produto e incentive a comunidade acadêmica. Alienar qualquer produto por R\$ 0,82 é quase que doar os equipamentos e repassar a responsabilidade do problema gerado, além de desvalorizar qualquer utilidade ou aproveitamento que possa advim de seu tratamento.

A rota do processamento preliminar proposto em escala piloto pelo processo hidrometalúrgico apresenta uma eficiência ótima, visto que há 40% de materiais metálicos presente em uma PCI extremamente heterogênea, além de possuir um baixo custo com menor geração de poluentes. Pode-se contar também, que o flowsheet apresentado é universal para todo e qualquer rota de tratamento de PCI via processo hidrometalúrgico, ou seja, há a possibilidade de serem simuladas outras propostas partindo do mesmo diagrama, estudando maiores margem de lucro.

Como também já discutido, é objetivo da Política Nacional de Resíduos Sólidos o incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental voltados para o reaproveitamento dos resíduos sólidos com o desenvolvimento de pesquisas e disposição final ambientalmente correta. Alienar o produto para uma empresa de reciclagem não é exatamente cumprir e compartilhar o ciclo de vida do produto seja na dimensão política, cultural, social ou ambiental.

## REFERÊNCIAS

MELO, Raffael Andrade Costa de. **ESTUDO DA LIXIVIAÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO DE COMPUTADORES DESKTOPS OBSOLETOS DA UFRN**. 2016. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

ABRANTES, Ricardo Jorge Dinis. **Reciclagem de Placas de Circuito Impresso: Otimização da Operação de Processamento Físico**. 2009. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009.

Associação Greenpeace, <http://www.greenpeace.org/>, visualizada em Setembro 2018;

AFONSO, Júlio Carlos. **LIXO ELETROELETRÔNICO**. Disponível em: <<http://cienciahoje.org.br/artigo/lixo-eletroeletronico/>>. Acesso em: 14 maio 2014.

Computer Industry Almanac, Worldwide Internet Users Estimate & Forecast, American Electronics Association;

Pesquisa Anual do Uso de TI nas Empresas, GVcia, FGV-EAESP, 29ª edição, 2018

JOURNEÉ, Milla. **O QUE VOCÊ PRECISA SABER SOBRE O LIXO ELETRÔNICO! FIQUE ATENTO AOS PONTOS DE COLETA!** Disponível em: <<http://smmaunistalda.blogspot.com/>>. Acesso em: 16 out. 2018.



PNUMA. **ONU Meio Ambiente:** Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/agencia/onumeioambiente/>>. Acesso em: 04 set. 2018.

BRAGA, Newton C.. **Placas de circuito impresso (ALM345)**. Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/almanaque-tecnologico/205-p/7551-placas-de-circuito-impresso-alm345>>. Acesso em: 26 ago. 2018.

CARVALHO, T. C. M. B.; XAVIER, L. H. Gestão de resíduos eletroeletrônicos: uma abordagem prática para a sustentabilidade. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

OLIVEIRA, P. C. F. Valorização de placas de circuito impresso por hidrometalurgia. Tese (Doutorado) – Instituto Superior Técnico, universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2012.

KASPER, A. C. Caracterização e reciclagem de materiais presentes em sucatas de telefones celulares. 2011. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Materiais da Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2011.

Printed Wiring Board Resource Center, <http://www.pwbrc.org/>, visualizada em Outubro 2018;

VENTURA, Eduardo Alberto Correia Cardoso. **Estudo de Processos Físicos para Recuperação de Metais de Placas de Circuito Impresso**. 2014. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Engenharia do Ambiente, Universidade do Porto, Portugal, 2014.

1º Relatório de progresso do projecto RECIMP. Reciclagem de placas de circuito impresso de resíduos de equipamento electrónico, 2009;

– Rolf Widmer, Heidi Oswald-Krapf, Deepali Sinha-Khetriwal, Max Schnellmann, Heinz Boni, “Global perspectives on E-waste”, *Environmental Impact Assessment Review*, 2005;

PETTER, P.M.H. Avaliação da eficiência da lixiviação de metais preciosos das placas de circuito impresso com utilização de lixiviantes alternativos ao cianeto. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

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

BIRLOAGA, I.; VEGLIÒ, F. Study of multi-step hydrometallurgical methods to extract the valuable content of gold, silver and copper from waste printed circuit boards. *Journal of Environ Chemical Engineering*, v.4, n.1, p.20-29, 2016.

QUIROZ, Yarli. **Placa de Circuito Impresso**. Disponível em: <[http://www.geocities.ws/gedaepage/Doc/PlacasCI/pci\\_artigo.htm](http://www.geocities.ws/gedaepage/Doc/PlacasCI/pci_artigo.htm)>. Acesso em: 16 nov. 2018.

VEIT, Hugo Marcelo. **Reciclagem de cobre de Sucata de Placas de Circuito Impresso**. 2005. 115 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2005.

Hoffmann, J. E.. Recovering precious metals from electronic scrap. *JOM*, July, 1992

LÓGICA, Saber Com. **Layout e Circuito Impresso de um placa mãe**. Disponível em: <<http://sabercomlogica.com/pt/ebook/layout-e-circuito-impresso-de-uma-placa-mae/>>. Acesso em: 16 nov. 2018.

MARTINS, Afonso Henriques et al. RECICLAGEM DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO DE COMPUTADORES SUCATADOS PARA A RECUPERAÇÃO DE ESTANHO POR ELETROELUIÇÃO DE RESINAS POLIMÉRICAS DE TROCA IÔNICA. *Holos*, [s.l.], v. 4, p.3-9, 2 ago. 2014.

H. Scott Matthews, Francis C. McMichael, Chris T. Hendrickson, Deanna J. Hart, “Disposition and end-of-life options for personal computers”, Carnegie Mellon University, Julho 1997;

CHOUBEY, P. K.; PANDA, R.; JHA, M. K.; LEE, J. C.; PATHAK, D. D. Recovery of copper and recycling of acid from the leach liquor of discarded Printed Circuit Boards (PCBs). *Separation and Purification Technology*, v.156, n.2015, p.269-275, 2015.

FERREIRA JUNIOR, O. L. Processos de separação de materiais metálicos e não metálicos na reciclagem de resíduos de placas de circuito impresso de microcomputadores. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

JUCHNESKI, N. C. F. Monitores de LCD: caracterização dos materiais e processamento mecânico das placas de circuito impresso. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

VEIT, H. M. Reciclagem de cobre de sucatas de placas de circuito impresso. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

Long L, Sun S, Zhong S, Dai W, Liu J, Song W. Using vacuum pyrolysis and mechanical processing for recycling waste printed circuit boards. *Journal of Hazardous Materials*. pp 626–632. 2010;

FOGARASI, S.; IMRE-LUCACI, F.; EGEDY, A.; IMRE-LUCACI, Á.; ILEA, P. Eco-friendly copper recovery process from waste printed circuit boards. *Waste Management*, v.40, p.136-143, 2015.

RANITOVIĆ, M.; KAMBEROVIĆ, Ž.; KORAC, M.; JOVANOVIĆ, N.; MIHAJLOVIĆ, A. Hydrometallurgical recovery of tin and lead from waste printed circuit boards (WPCBs): Limitations and Opportunities. *Metalurgija*, v.55, n.2, p.153-156, 2016.

SOMASUNDARAM, M.; SARAVANATHAMIZHAN, R.; AHMED BASHA, C.; NANDAKUMAR, V.; NATHIRA BEGUM, S.; KANNADASAN, T. Recovery of copper from scrap printed circuit board: Modelling and optimization using response surface methodology. *Powder Technology*, v.266, p.1-6, 2014.

YAMANE, L. H. Recuperação de metais de placas de circuito impresso de computadores obsoletos através de processo biohidrometalúrgico. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

KUMARI, A.; JHA, M. K.; SINGH, R. P. Recovery of metals from pyrolysed PCBs by hydrometallurgical techniques. *Hydrometallurgy*, v.165, p.97-105, 2016.

Duan H, Hou K, Li J, Zhu X. Examining the technology acceptance for dismantling of waste printed circuit boards in light of recycling and environmental concerns. *Journal of Environmental Management*. pp 392–399. 2011;

Schweickardt A. Utilização de um eletrodo poroso percolado pulsado para a recuperação de prata em banhos fotográficos. Universidade de Brasília; 2006.

Xiang Y, Wu P, Zhu N, Zhang T, Liu W, Wu J, et al. Bioleaching of copper from waste printed circuit boards by bacterial consortium enriched from acid mine drainage. *Journal of Hazardous Materials*. pp 812–818. 2010;

Goosey M, Kellner R. Recycling technologies for the treatment of end of life printed circuit boards (PCBs). *Circuit World*. pp 33–37. 2003;

Yamane L, de Moraes V, Espinosa D, Tenório J. Recycling of WEEE: characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers. *Waste Management*. pp 2553–2558. 2011;

Hagelüken C. Improving metal returns and eco-efficiency in electronics recycling metals smelting and refining. *Unicore Precious Metals Refining*. pp 218–223. 2006;

Tuncuk A, Stazi V, Akcil A, Yazici EY, Deveci H. Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling. *Minerals Engineering*. pp 28–37. 2012;

HIPOLITO, Israel da Silva; HIPOLITO, Rafael da Silva; LOPES, Gean de Almeida. **POLÍMEROS NA CONSTRUÇÃO CIVIL: Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia**. 2013. XSEGeT. Disponível em: <<https://www.aedb.br/wp-content/uploads/2015/05/5518429.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2013.

ALUMASA Alumínio e Plástico. Disponível em: <<http://alumasa.com.br/index.php/a-empresa/>>. Acesso em: 17 nov. 2018.

YCHARTS. **Preço do preço do minério de ferro (qualquer origem)**. *Commodity Markets Review*. 2018. Disponível em: <[https://ycharts.com/indicators/iron\\_ore\\_spot\\_price\\_any\\_origin](https://ycharts.com/indicators/iron_ore_spot_price_any_origin)>. Acesso em: 17 nov. 2018.

SIGAA UFRN Sistema Integrado de Gestão de Atividades Acadêmicas 2018. Disponível em: < <file:///C:/Users/USer/Desktop/N%C3%83O%20EXCLUIR/TCC/Proj.ext.carlson.2010.pdf> >. Acesso em: 20 nov. 2018