

CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

Prêmio Ecologia 2017: Categoria Educacional

Nome da escola: **EEEFM Dr. Francisco Freitas Lima**

Professora responsável pela implantação deste projeto: **Luciana Harue Yamane**

Situação atual do projeto: **em fase de elaboração de relatório final e prestação de contas (data de encerramento do projeto: 31/10/2017).**

CONTEXTUALIZAÇÃO

O projeto “Caracterização ambiental de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos” surgiu a partir do Edital FAPES nº14/2014, um dos programas prioritários do Espírito Santo, sendo denominado “Programa Pesquisador do Futuro”, que concedeu bolsas de Iniciação Científica Júnior a estudantes dos ensinos fundamental e médio da rede pública de ensino, para que participassem de um projeto de pesquisa, coordenado por pesquisador com qualificação e experiência, e teve como objetivo atrair jovens estudantes para o mundo das Ciências, com a possibilidade de vivenciar a realidade do ambiente universitário, e despertar o interesse em dar continuidade aos estudos e futuramente o ingresso no ensino superior.

O projeto desenvolvido se relaciona diretamente com o tema do Prêmio Ecologia 2017, pois busca exatamente uma solução ambiental para o problema dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos e sua crescente geração, sendo que a caracterização ambiental é o primeiro passo na busca por inovações tecnológicas que visem a reciclagem destes resíduos.

Por ser um campo de pesquisa ainda recente no Brasil, principalmente em função da carência de legislação, apesar do problema ter proporções mundiais, destaca-se a importância conceitual do trabalho e o potencial de replicação do mesmo em outras escolas, de forma a despertar a consciência ambiental dentro de escolas de ensino fundamental e médio naqueles que serão os futuros gestores dos resíduos sólidos gerados pela sociedade.

Os alunos de ensino médio envolvidos no projeto, além de compreender a necessidade do gerenciamento dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos, puderam acompanhar efetivamente de que forma a pesquisa científica pode contribuir na busca de soluções para os problemas enfrentados pela sociedade moderna.

Por fim, o projeto buscou de forma original criar uma ponte entre a Universidade, seus pesquisadores e alunos de graduação, e os alunos de ensino médio da rede pública de ensino do ES.

JUSTIFICATIVA

O gerenciamento dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) se justifica sob os pontos de vista ambiental, econômico, legal e social, sendo que o dimensionamento e planejamento do sistema de gerenciamento depende tanto de dados de geração quanto de caracterização ambiental, foco principal do presente trabalho.

Os REEE são gerados quando equipamentos elétricos ou eletrônicos chegam ao final de sua vida útil por estarem obsoletos ou danificados. Vários fatores desencadeiam a crescente geração de REEE, tais como: o aumento da dependência tecnológica, a obsolescência programada, as constantes inovações tecnológicas e os preços cada vez mais acessíveis (NATUME & SANT'ANNA, 2011; RODRIGUES, 2012). Os REEE são gerados em todos os setores (industrial, hospitalar, comercial, residencial, educacional e institucional) e iniciativas visando a reciclagem devem ser estimuladas (RODRIGUES, GUNTHER & BOSCOV, 2015). O crescente consumo de equipamentos eletroeletrônicos tem o potencial de expandir a economia e os níveis sociais, porém tem sido foco de crescente preocupação com relação aos impactos ambientais e sociais potencialmente negativos associados ao uso, fabricação, tratamento e destino final dos REEE (REIDLER, 2012).

Sob o ponto de vista ambiental, a reciclagem diminui a extração de matéria-prima, evita a contaminação ambiental em função do descarte inadequado devido à presença de substâncias perigosas, aumenta a vida útil de aterros sanitários e minimiza o consumo de energia já que a redução de minérios para a produção de metais consome mais energia do que a recuperação dos mesmos já em estado metálico a partir de REEE (ROCHA *et al.*, 2009; REIDLER, 2012). Economicamente, a reciclagem também pode ser uma oportunidade de negócio, visto que materiais valiosos, como ouro e prata estão presentes em REEE em concentrações superiores a encontradas em minérios (USGS, 2014). Além disso, a reutilização de peças promove a inclusão digital, tanto pelo preço mais acessível quanto pelo reuso em equipamentos danificados.

Com relação ao aspecto legal, a Lei 12.305/2010, conhecida como Política Nacional de Resíduos Sólidos, determina que um sistema de logística reversa seja implantado para REEE (BRASIL, 2010), mas, vale ressaltar que o sistema ainda está em fase de implementação e ainda não há regulamentação com relação a metas de coleta e reciclagem.

Por fim, há ainda os aspectos sociais que envolvem as consequências da exportação ilegal para países em desenvolvimento, incluindo o Brasil, onde toneladas de REEE são abandonadas em áreas irregulares, contaminando o meio ambiente e as pessoas que residem no entorno (TROMBINI & GOMES, 2013). Além disso, a reciclagem informal emprega

trabalhadores, muitas vezes crianças, que ficam expostos a riscos à saúde. A inclusão formal das associações de catadores de materiais recicláveis, já prevista em lei, para coleta e desmontagem dos REEE poderia aumentar a renda dos associados e consequentemente a sustentabilidade das mesmas.

A caracterização ambiental permite determinar a composição do REEE, e dessa forma, identificar a presença de materiais valiosos e/ou contaminantes. Esta informação é imprescindível para determinar o potencial de reciclagem de um REEE ou a necessidade de tratamento especial para evitar a contaminação ambiental.

PÚBLICO DIRETAMENTE BENEFICIADO

Os alunos de ensino médio escolhidos para participar do projeto como bolsistas foram diretamente beneficiados, pois permitiu a aproximação com o meio acadêmico estimulando dessa forma o ingresso na graduação e a participação futura em atividades de pesquisa, e conseqüentemente, possui impactos científicos indiretos pois estes alunos poderão se tornar futuros pesquisadores. Os impactos econômico e social estão relacionados a concessão das bolsas aos alunos, que estimulou a permanência dos mesmos no ambiente escolar, e portanto, reduzindo o risco social.

Os alunos tiveram uma visão geral de como é realizada uma pesquisa científica, contextualizada ainda, com um tema atual e de relevância ambiental, que é a reciclagem de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos.

O restante dos alunos da EEEFM Dr. Francisco de Freitas Lima foram indiretamente beneficiados através da campanha de conscientização desenvolvida pelos Bolsistas de ICJ, estimulando o descarte adequado de REEE, evitando desta forma que este resíduo, que possui potencial de contaminação de solo, ar e água, seja disposto inadequadamente.

OBJETIVOS

O objetivo geral do projeto foi inserir os bolsistas de ICJ em todas as etapas de uma pesquisa científica de caracterização ambiental de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos.

Objetivos específicos:

- Realizar o alinhamento de conhecimento temático;
- Promover o descarte voluntário de REEE em um ponto de coleta voluntário criado dentro da escola;
- Identificar materiais valiosos contidos no REEE através da desmontagem seletiva e categorização;

- Explicar as diferentes opções de pós-graduação e os principais passos de uma pesquisa científica;
- Introduzir conceitos de práticas laboratoriais;
- Apresentar os laboratórios de pesquisa da UFES, em especial, o Laboratório de Caracterização Ambiental de Resíduos;
- Propiciar o contato com pesquisadores da universidade e suas respectivas áreas de atuação;
- Analisar e discutir os resultados da caracterização ambiental de REEE;
- Introduzir as diferentes formas de apresentação dos dados de pesquisa e as formas de divulgação.

METODOLOGIA

Local do projeto

A Escola Estadual de Ensino Fundamental e Técnico Dr. Francisco Freitas Lima está localizada numa área de vulnerabilidade social, entre os aglomerados de Soteco e São Torquato em Vila Velha.

O projeto foi desenvolvido com alunos da 1ª e 2ª série do ensino médio dos cursos técnicos integrados em logística e portos da EEEFM Dr. Francisco Freitas Lima.

Métodos

A metodologia foi dividida em 7 etapas, sendo:

- **Etapa 1 - Palestras sobre resíduos de equipamentos eletroeletrônicos**

Nesta etapa foram realizadas palestras sobre o tema "Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos" visando o alinhamento de conhecimento temático. As palestras foram ministradas pela Coordenadora do projeto no período de 11/12/2015 a 18/05/2016, com duração de 4 horas cada, sendo divididas em 2 horas de exposição teórica e 2 horas de debates em grupo ou atividades de fixação de conteúdo.

Foram exploradas questões referentes à geração; composição; *ecodesign*; aspectos legais, ambientais e econômicos; logística reversa, e formas de tratamento de REEE, sendo encaixadas dentro da disciplina de Biologia e Química.

- **Etapa 2 - Campanha de conscientização e criação de ponto de coleta de REEE na escola**

Após o alinhamento de conhecimento temático, foi criado um ponto de coleta de REEE dentro da escola, promovido pelos Bolsistas de ICJ através de uma campanha de

conscientização com o uso de cartazes e divulgação em todas as salas de aula.

O propósito desta etapa foi promover o descarte voluntário de equipamentos eletroeletrônicos danificados ou obsoletos, e dessa forma, fornecer os materiais de estudo para as etapas posteriores.

Os cartazes foram elaborados pelos próprios alunos com uso de cartolinas, jornais, revistas, dentre outros materiais, com o objetivo de chamar atenção sobre a importância do projeto e colados em pontos estratégicos da escola.

- **Etapa 3 - *Workshop* de desmontagem seletiva e categorização de REEE**

Os REEE descartados no ponto de coleta foram classificados, quantificados, desmontados seletivamente e categorizados. As finalidades desta etapa foram: demonstrar o potencial de reciclagem dos REEE, a possibilidade de agregação de valor através do beneficiamento primário (desmontagem seletiva e categorização) e a remoção das placas de circuito impresso (PCI) para a etapa seguinte.

Primeiramente foi realizada a classificação dos REEE por tipo de equipamento (celulares, desktops, eletrodomésticos, rádios, etc), que foram pesados para posterior discussão dos dados de geração.

A desmontagem seletiva e a categorização foram realizadas em *workshops* no qual os alunos aprenderam a identificar os materiais valiosos contidos no REEE. Foram utilizados kits de ferramentas para auxiliar a desmontagem. A categorização foi realizada através da separação de peças e componentes a partir de sua composição.

- **Etapa 4 - Iniciação à pesquisa científica**

Nesta etapa foi realizado um novo ciclo de palestras para apresentar as principais fases de uma pesquisa científica (identificação do problema, fundamentação teórica sobre o assunto, mecanismos de busca de referências, delineamento da pesquisa e definição da metodologia, investigação experimental e análise de resultados) e as diferentes opções de pós-graduação (especialização, MBA, mestrado profissional, mestrado, doutorado, doutorado direto e pós-doutorado).

- **Etapa 5 - Introdução às práticas laboratoriais**

Esta etapa foi realizada em dois módulos (teórico e prático). No módulo teórico foram apresentados: vidrarias, equipamentos, procedimentos laboratoriais e noções de biossegurança, através de aulas expositivas. No módulo prático foram utilizados materiais didáticos (vidrarias e instrumentos de uso regular em laboratório) e equipamentos de bancada. Os alunos manusearam e exploraram os materiais de forma a se familiarizar com os procedimentos laboratoriais preparando-os para a visita técnica (etapa seguinte).

- **Etapa 6 - Visita técnica**

Nesta etapa, os alunos visitaram a Universidade Federal do Espírito Santo e vivenciaram o cotidiano de alunos de graduação envolvidos em pesquisas científicas. Além da Biblioteca e do Restaurante Universitário, foram visitados o Laboratório de Caracterização Ambiental de Resíduos (LACAR), coordenado pelo Prof. Dr. Renato Ribeiro Siman, Laboratório de Ensaio de Materiais da Construção Civil (LEMAC), coordenado pela Profª. Dra. Geilma Lima Vieira, e os laboratórios do Núcleo de Competências em Química do Petróleo (NCQP). Os alunos acompanharam um ensaio de caracterização para determinação dos elementos metálicos presentes nas placas de circuito impresso que foram removidas na Etapa 3.

O ensaio de caracterização envolveu a lixiviação química de amostras de 1 a 5g de PCI solubilizadas com água-régia na proporção 1:20, isto é, 1g de PCI para 20mL de solução de água-régia. O contato entre a amostra e a água-régia durou 24 horas para garantir completa digestão dos metais, seguido de filtração simples com papel de filtro quantitativo. Assim, foram obtidas 2 frações: fração lixiviada, a qual deve conter água-régia e metais solubilizados e fração não-lixiviada que corresponde aos sólidos não solúveis retidos no papel de filtro, este material indica a quantidade de materiais cerâmicos e poliméricos. As soluções lixiviadas foram analisadas para determinação dos metais pela técnica de espectrometria de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente (ICP OES).

Em virtude da lixiviação ácida durar 24h, uma amostra de PCI foi previamente lixiviada no dia anterior, de forma a permitir demonstrar todas as etapas da caracterização.

- **Etapa 7 - Análise e discussão dos resultados obtidos no ensaio de caracterização**

Esta etapa final envolveu a análise e discussão dos resultados obtidos no ensaio de caracterização, além da introdução das diferentes formas de apresentação dos dados de pesquisa (tabelas, gráficos, balanços de massa, análises estatísticas, dentre outros), e avaliação do potencial de reciclagem das PCI.

Por fim, foram apresentadas as diferentes formas de divulgação dos dados de pesquisa (revistas científicas, eventos científicos, patentes, entrevistas, dentre outros) e sua importância.

RESULTADOS ALCANÇADOS E MATERIAIS COMPROBATÓRIOS DAS ATIVIDADES

O projeto permitiu que os alunos desenvolvessem uma consciência ambiental acerca da necessidade de gerenciamento dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos, sendo replicadores deste conhecimento, e de forma inovadora, se envolvessem com o universo da

pesquisa científica. Através do projeto os alunos conheceram todos os aspectos (ambientais, sociais, políticos, econômicos e tecnológicos) diretamente relacionados a esta problemática, e partir daí se envolveram em atividades que começaram com a conscientização ambiental dentro do ambiente escolar através de uma campanha de descarte voluntário, a desmontagem e a identificação de materiais valiosos passíveis de reuso ou reciclagem, os passos a serem trilhados dentro de uma pesquisa científica, desde a identificação do problema e sua justificativa, determinação do objetivo da pesquisa e possíveis métodos a serem aplicados, e por fim, a efetiva realização da pesquisa científica, que nesse caso envolveu uma parte experimental desenvolvida dentro de laboratório, sendo por isso necessário um treinamento dos alunos antes da visita aos laboratórios de pesquisa da UFES, finalizando com a discussão dos resultados. Ressalta-se ainda, que o objetivo final foi determinar o potencial de reciclagem e contaminação através da caracterização, que é o primeiro passo para a implementação do gerenciamento de REEE. Os resultados alcançados em cada etapa do projeto são apresentados detalhadamente a seguir.

- **Etapa 1 - Palestras sobre resíduos de equipamentos eletroeletrônicos**

A Primeira palestra ocorreu no dia 11/12/2015 com o tema: Introdução ao Projeto Pesquisador do Futuro. Foram introduzidos conceitos e informações básicas sobre resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) como objeto de pesquisa, e destacada a importância da escolha do tema utilizando reportagens divulgadas na mídia impressa através de uma dinâmica em grupo. Os alunos fizeram apresentação em dupla do conteúdo da reportagens destacando os pontos principais. Foram apresentados os vídeos da série de reportagens especiais sobre REEE exibidas no Jornal Nacional no dias 9 a 13 de novembro de 2015, demonstrando dessa forma, a importância que o REEE vem ganhando.

No dia 18/12/2015, a segunda palestra abordou a crescente geração de REEE e os fatores que a influenciam. Na dinâmica realizada depois da palestra, os alunos identificaram em revistas, encartes de supermercados e jornais, os potenciais produtos/equipamentos que se tornarão ao final do ciclo de vida um resíduo de equipamento eletroeletrônico.

Como o início da vigência do projeto ocorreu em 01/11/2015 e o período letivo de 2015 encerrou no dia 18/12/2015, somente duas palestras ocorreram no ano de 2015. Dessa forma, o período inicialmente previsto de 3 meses para o alinhamento de conhecimento temático precisou ser estendido, mas não afetou o andamento do projeto.

Os alunos ficaram com material impresso para leitura durante o recesso escolar e como atividade extra, desenvolver idéias de práticas didáticas para serem apresentadas no fim do recesso escolar.

No retorno das atividades (no dia 17/02/2016) foi realizado um *brainstorm* para discussão de práticas didáticas e como os alunos gostariam que os assuntos fossem abordados. Foi lançada a gincana do REEE mais antigo, na qual o aluno que levar o REEE mais antigo que encontrasse em casa seria premiado. Também foi apresentada a Plataforma Lattes no Laboratório de informática promovendo uma discussão sobre o Currículo lattes.

No dia 24/02/2016 foi realizada a terceira palestra com o tema “Composição dos REEE”. Como forma de incentivo, a aluna Quézia foi premiada na gincana “REEE mais antigo” por ter levado o equipamento eletroeletrônico mais antigo.

A quarta palestra com o tema “Legislação brasileira sobre REEE” foi ministrada no dia 02/03/2016. Neste mesmo dia foram realizadas duas atividades com os alunos envolvendo o tema da palestra anterior (composição do REEE), sendo uma palavra cruzada com os principais materiais contidos no REEE e uma dinâmica na qual os alunos classificaram os diferentes tipos de EEE de acordo com a classificação proposta pela ABINEE (linha azul, verde, marrom e branca).

Continuando o tema legislação, no dia 09/03/2016 foi ministrada a 5ª palestra com o tema “Legislação internacional sobre REEE”. Foram realizadas duas atividades com os alunos. Na primeira, os alunos definiram a hierarquização da gestão dos resíduos sólidos preconizada pela Política nacional de resíduos sólidos, e na segunda, identificaram o ciclo de vida dos equipamentos eletroeletrônicos e a logística reversa dos REEE.

A tema *Ecodesign* ou design sustentável foi abordado no dia 16/03/2016. Foram realizados ajustes nas atividades desenvolvidas de forma a despertar cada vez mais o interesse e a participação, e dessa forma, observou-se que o melhor formato de trabalho com os alunos seria de: realização de 2 atividades de fixação de conteúdo sobre o tema anterior com posterior correção e discussão, sendo uma antes e outra depois de uma palestra expositiva de 1 hora, e um intervalo de 15min. Este formato foi discutido e aprovado pelos alunos, monitoras, tutor e estabelecido como padrão.

No dia 23/03/2016 o tema da palestra foi “aspectos ambientais e sociais relacionados à reciclagem de REEE”. Conforme estabelecido, também foram realizadas atividades de fixação de conteúdo acerca de *Ecodesign*.

Os aspectos econômicos envolvendo à reciclagem de REEE foi tema da palestra ministrada no dia 30/03/2016. O assunto foi discutido e dentre as tarefas usuais, os alunos tiveram que calcular o valor de ouro encontrado em 1 tonelada de resíduo de equipamentos eletroeletrônicos, chegando ao resultado de R\$28.120,00.

De forma a dinamizar as atividades, as monitoras do projeto apresentaram no dia 06/04/2016 empresas que coletam, classificam, processam e revendem o resíduo eletroeletrônico no Brasil, relatando as dificuldades técnicas, logísticas e financeiras de operacionalizar centro de recebimento e reciclagem de REEE no Brasil, abordando dessa forma, os temas de todas as palestras ministradas. Aos alunos foi passada a tarefa de escolher um dos temas já abordados nas palestras, pesquisar o assunto e preparar uma apresentação.

No dia 13/04/2016, duas duplas de alunos fizeram apresentação oral em duplas utilizando como recurso: o programa *Powerpoint*. Os temas escolhidos foram: *ecodesign* e logística reversa. No dia 27/04/2016, as duplas deram continuidade às apresentações orais discutindo os temas: reciclagem e composição.

O tema Logística reversa foi abordado no dia 11/05/2016 discutindo as dificuldades de implantação do sistema de logística reversa de REEE no Brasil e quais as recomendações da Associação Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI).

No dia 18/05/2016 o tema da palestra foi tratamento mecânico para reciclagem de REEE. Também foi passado um vídeo da empresa *Sims Recycling* da Holanda mostrando o processamento mecânico em escala industrial, finalizando dessa forma a etapa de alinhamento temático, que apesar de ter iniciado no dia 11/12/2015, durou 3 meses, conforme previsto, se for levar em consideração apenas o período efetivo de atividades.

- **Etapa 2 - Campanha de conscientização e criação de ponto de coleta de REEE na escola**

A confecção do material de divulgação da campanha de conscientização foi realizada em dois momentos, sendo no primeiro, a discussão de idéias e levantamento do material necessário, e posteriormente, a montagem dos cartazes, tendo ocorrido entre os dias 22/06/2016 e 06/07/2016. A Figura 1 mostra os cartazes confeccionados. Foram utilizados papel kraft, recortes de revistas, folhetos de propaganda e jornais, para montagens, além de desenhos feitos pelos próprios alunos.



Figura 1 – Cartazes da “Campanha de descarte correto de lixo eletrônico” fixados na EEEFM Dr. Francisco de Freitas Lima. (a) Cartaz fixado na entrada da escola. (b) Cartazes fixados no pátio da escola.

Após a elaboração dos cartazes mostrados na Figura 1, os alunos foram divididos em grupos e foram nas salas de aula divulgar a campanha de descarte voluntário de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (vide Figura 2).



Figura 2 – Divulgação da “Campanha de descarte correto de lixo eletrônico” nas salas de aula pelos bolsistas de ICJ.

Ao final da campanha foram descartados 65 unidades de REEE pesando no total 42,5kg, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Levantamento da quantidade de REEE descartado na “Campanha de descarte correto de lixo eletrônico”.

RESÍDUO	QUANTIDADE (unidades)	PESO TOTAL (kg)
CELULAR	48	5,55
SOM	2	3,75
TV PORTÁTIL	1	2,10
NETBOOK	1	1,07
DISCMAN	1	0,21
MOUSE	2	0,09
WEBCAM	1	0,08
CAIXA DE SOM	1	0,82
CÂMERA	1	0,12
CPU	4	28,30
RÉGUA ELETRÔNICA	1	0,06
MP4	1	0,04
FONTE DE IMPRESSORA	1	0,36
TOTAL	65	42,54

A Figura 3 apresenta graficamente os REEE coletados na campanha (em unidades) separados por tipo.

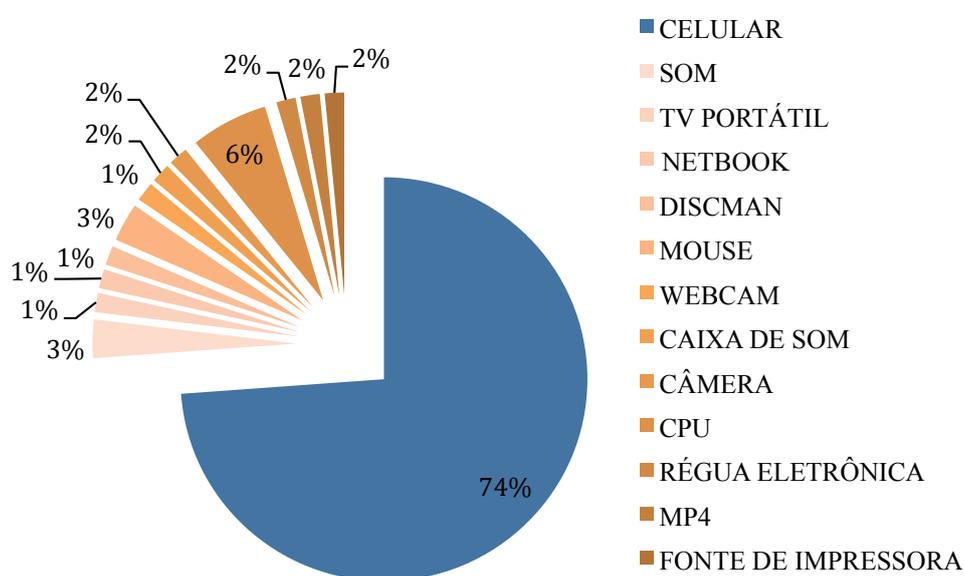


Figura 3 – Tipos de REEE descartados na “Campanha de descarte correto de lixo eletrônico”.

Conforme pode ser observado na Figura 3, os aparelhos de celular representaram 74% dos REEE descartados. Uma pesquisa conduzida por Panambunan-Ferse e Breiter (2013) mostra que 60% das pessoas guardam telefones celulares que estão fora de uso em suas casas, e dessa

forma, os dados de geração podem ser ainda maiores, já que esses equipamentos não são contabilizados.

- **Etapa 3 - *Workshop* de desmontagem seletiva e categorização de REEE**

Foi realizado o *workshop* de desmontagem seletiva e categorização de todo o REEE recebido durante a campanha de descarte voluntário, sendo que ao todo foram desmontados 29 unidades de REEE em 3 dias, conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Levantamento dos REEE desmontados nos *workshops* de desmontagem seletiva e categorização.

RESÍDUO	QUANTIDADE (Unidades)	PESO TOTAL (kg)
CELULAR	16	1,52
SOM	1	1,75
<i>NETBOOK</i>	1	1,07
CAIXA DE SOM	1	0,82
RÉGUA ELETRÔNICA	1	0,06
MP3	1	0,04
<i>WEBCAM</i>	1	0,08
CPU	2	14,00
<i>MOUSE</i>	2	0,09
<i>DISCMAN</i>	1	0,21
CÂMERA DIGITAL	1	0,12
TV PORTÁTIL	1	2,10
TOTAL	29	21,858

Nos *workshops*, os Bolsistas de ICJ fizeram a desmontagem manual e aprenderam a identificar os materiais valiosos contidos no REEE. A Figura 4 mostra alguns dos REEE desmontados e Figura 5 mostra os bolsistas de ICJ desmontando os REEE.



Figura 4 - Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos recebidos na “Campanha de descarte correto de lixo eletrônico” e desmontados manualmente.



Figura 5 – Desmontagem manual de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos realizada pelos bolsistas de ICJ.

Após a desmontagem manual dos REEE, os materiais foram classificados e os resultados são apresentados na Figura 6.

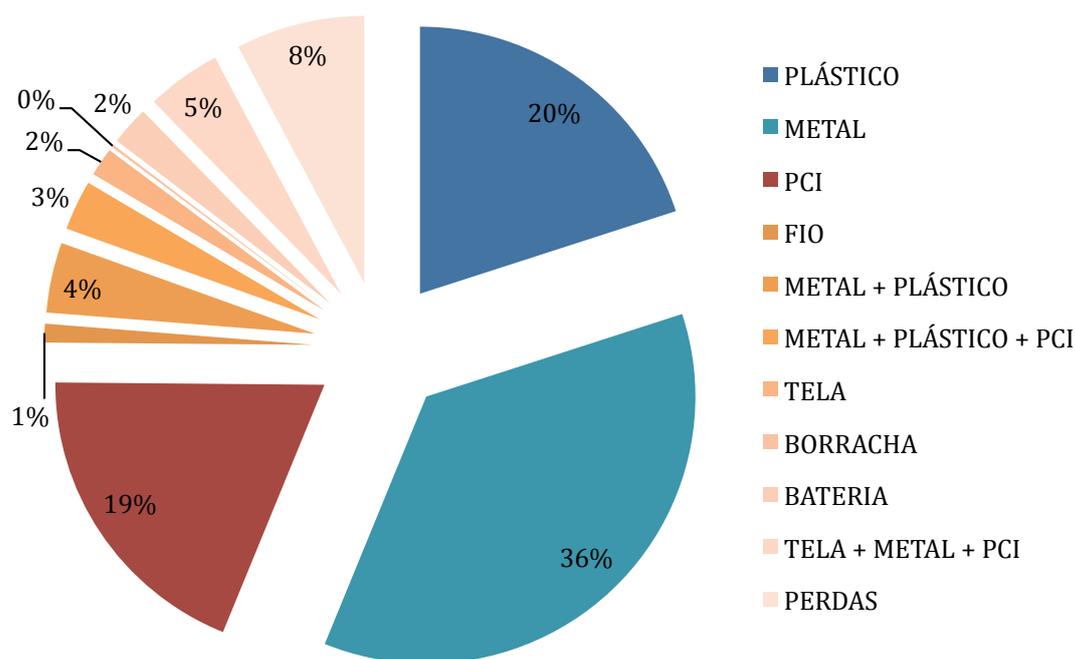


Figura 6 – Composição dos REEE desmontados manualmente. Legenda: PCI – placas de circuito impresso.

Conforme apresentado na Figura 6, o metal é o material encontrado em maior quantidade nos REEE desmontados manualmente, representando 36%, seguido do plástico (20%) e das placas de circuito impresso (19%). A composição dos resíduos eletroeletrônicos é um fator de relevância por ser extremamente peculiar e individual para cada categoria de equipamentos (PORTAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 2015).

Os equipamentos eletroeletrônicos podem apresentar até 60 tipos de elementos diferentes, sendo alguns valiosos e outros perigosos (UNEP, 2015). Segundo a ABDI (2013), os diversos materiais que compõem os REEE são: polímeros, vidros, componentes eletrônicos, metais, dentre outros, e estes materiais estão frequentemente dispostos em camadas e subcomponentes afixados por solda ou cola. Alguns equipamentos ainda recebem jatos de substâncias químicas específicas para finalidades diversas como proteção contra corrosão ou retardamento de chamas (ABDI, 2013).

Segundo Park & Fray (2008), os metais que são encontrados no REEE incluem cobre, ferro, níquel, alumínio, chumbo e zinco. Os metais preciosos são: prata (0,2%), o ouro (0,1%) e o paládio (0,005%) e estão na forma de filme fino sobre outros metais base e cerâmicos (PARK & FRAY, 2008).

A fim de lidar com a complexidade dos materiais encontradas nos REEE, Crowe *et al.* (2003) sugerem seis categorias:

- Ferro e aço – usados para revestimentos e quadros;
- Materiais não ferrosos – especialmente o cobre usado em cabos, e o alumínio;
- Vidro – usado para telas;
- Plástico – usado como revestimento em cabos e em placas de circuito impresso;
- Dispositivos eletrônicos – usados em placas de circuito impresso;
- Outros – borracha, madeira, cerâmica e etc.

A título de exemplo, um trabalho realizado por Gerbase & Oliveira (2012) determinou a quantidade aproximada de elementos que podem ser recuperados em dois tipos de equipamentos eletroeletrônicos (computadores e celulares), sumarizados na Tabela 3.

Tabela 3 - Quantidade de materiais presentes em resíduos de equipamentos eletroeletrônicos.

REEE	Quantidade	Material
Computadores	1 computador	- 28% de metais (cobre, ferro, zinco, prata, ouro, entre outros); - 19% de plástico; - 4% de bromo; - 49% de meterias cerâmicos, vidros e óxidos
Celulares (sem e bateria)	1 tonelada	- 3,5kg de prata; - 340g de ouro; - 140g de paládio; - 130kg de cobre

Fonte: Gerbase & Oliveira, 2012.

Além dos materiais que podem recuperados apresentados na Tabela 3, vale ressaltar que os REEE apresentam em sua composição elementos perigosos a saúde humana e ao meio ambiente. Cui e Forssberg, (2003) listaram alguns destes materiais perigosos (vide Tabela 4).

Tabela 4 - Componentes perigosos em resíduos de equipamentos eletroeletrônicos.

Materiais e Componentes	Descrição
Baterias	Metais pesados como chumbo, mercúrio e cádmio podem estar presentes
Telas de tubos catódicos	Chumbo no cone de vidro e camada fluorescente dentro de painel de vidro
Componentes contendo mercúrio, como interruptores	Mercúrio é usado em termostato, sensores e interruptores. É usado também em equipamentos médicos, transmissores de dados, telecomunicação e celulares.
Resíduos de amianto	Resíduos de amianto tem de ser tratado seletivamente Cartuchos de tinta e toners devem ser removidos e coletados separadamente devido a tinta residual que pode conter chumbo.
Placas de circuito impresso	Em placas de circuito impresso se encontram cádmio em certos componentes como, chips, detectores e semicondutores e chumbo nas soldas
Capacitores contendo bifenilas policloradas	Capacitores devem ser removidos, pois caso venham ser incinerados geram gases tóxicos
Monitores de cristal líquido (LCDs)	LCDs com uma superfície superior que 100cm ² devem ser removidos de REEE
Plásticos contendo retardadores de chama halogenados	Durante a incineração/combustão do plástico os retardadores de chamas podem produzir gases tóxicos HCFC ou CFCs presentes na espuma e no circuito de refrigeração devem ser propriamente extraídos e destruídos ou reciclados
Equipamentos contendo CRC HCFC ou HFCs	
Gás de lâmpadas	Mercúrio tem de ser removido

Fonte: Adaptado de Cui & Forssberg, 2003.

Desta forma, devido à presença dos componentes apresentados nas Tabelas 3 e 4, os REEE requerem cuidado no manuseio e na disposição final. No entanto, pode-se dizer que os resíduos eletroeletrônicos são provedores secundários de uma considerável quantidade de recursos para reciclagem e conhecer sua composição é fundamental para sua gestão (BALDÉ, 2015).

- **Etapa 4 - Iniciação à pesquisa científica**

No segundo ano de projeto deu-se continuidade à Etapa 4 - Iniciação à pesquisa científica, iniciada em 2016 e finalizada no dia 26/04/2017. Como atividade final desta etapa, todos os bolsistas de ICJ entregaram uma proposta escrita de projeto de pesquisa no qual puderam escolher livremente um tema e apresentaram oralmente. Apesar de não estar relacionado ao tema principal do projeto, a saber, resíduos de equipamentos eletroeletrônicos, esta proposta visou demonstrar a importância da pesquisa científica e como a afinidade pessoal com determinadas áreas ou o interesse pessoal por problemas cotidianos têm potencial para se tornar um objeto de pesquisa e inovação. O resultado foi surpreendente e gratificante, pois demonstrou que além da criatividade e da busca pelo conhecimento, as motivações pessoais e

o impacto de grandes tragédias são a principal engrenagem que fomentam a vontade de investigar um assunto.

Como exemplo de motivações pessoais, pode-se citar as propostas das alunas Quézia, Amanda e Giulia. A Quézia gostaria de pesquisar um dispositivo mecânico, como uma cinta, que aliviasse dores de cólicas menstruais em mulheres alérgicas aos medicamentos tradicionais existentes, já a aluna Amanda propôs como pesquisa a busca de um novo medicamento que evitasse a queda de cabelos em pessoas que realizam tratamentos quimioterápicos, pois sua avó enfrentou um câncer de mama, e passou por esse problema. A Giulia expôs seu problema pessoal com estresse traumático ligado à depressão como objeto de estudo com intuito de modificar o comportamento dos que a rodeiam e pesquisar métodos de auto-ajuda acessíveis, citando a pintura como uma das possibilidades.

Com relação ao impacto de grandes tragédias, pode-se citar o trabalho dos alunos Matheus, Isabela e Luciano. A Isabela e o Matheus escolheram a tragédia do vazamento da lama da Samarco da barragem em Mariana-MG como tema, sendo os objetos de estudo: o estudo de técnicas melhoradas de construção de barragens, e métodos de descontaminação e remoção da lama do Rio Doce, respectivamente. A proposta do aluno Luciano teve como objeto de estudo a criação de dispositivos que visem a segurança de passageiros durante voos à luz da tragédia com o avião que transportava o time de futebol da Chapecoense.

Durante a orientação para a apresentação das propostas foi repassada a importância do pesquisador ter afinidade com o tema a ser pesquisado. Ficou clara a relevância de todas as propostas apresentadas e todos os alunos conseguiram encontrar uma lacuna de conhecimento e perceber a importância da figura de um pesquisador na busca por estas respostas.

- **Etapa 5 - Introdução às práticas laboratoriais**

Na quinta etapa, os bolsistas de ICJ manusearam vidrarias, instrumentos de uso regular em laboratório e equipamentos de bancada em aulas práticas, se familiarizando dessa forma com as atividades realizadas dentro de um laboratório, que os preparou para a visita técnica, conforme ilustra a Figura 7.



Figura 7 – Bolsistas de ICJ durante a realização do módulo prático da Etapa 5.

Através das aulas práticas (Figura 7), os alunos aprenderam os procedimentos básicos que foram necessários no ensaio de caracterização ambiental.

- **Visita técnica à UFES.**

Os Bolsistas de ICJ realizaram visita técnica à UFES no dia 12/07/2017. O roteiro da visita foi: NCPQ, Biblioteca Central, Restaurante Universitário, LEMAC e LACAR.

O primeiro prédio visitado foi o Núcleo de Competências em Química do Petróleo (NCQP) do Programa de Pós-Graduação em Química da UFES, que exige o uso de jalecos como equipamento de segurança, conforme mostra a Figura 8.



Figura 8 – Visita dos bolsistas de ICJ ao NCPQ/UFES.

Após o NCPQ, os bolsistas foram conhecer a Biblioteca Central e receberam a orientação do bibliotecário que mostrou o sistema de busca e organização do acervo, e em seguida os bolsistas almoçaram no Restaurante Universitário, vide Figura 9.



Figura 9 – Visita dos bolsistas de ICJ à Biblioteca Central da UFES.

Após o almoço no Restaurante Universitário, os bolsistas de ICJ seguiram para o Laboratório de Ensaios de Materiais da Construção Civil (LEMAC) sendo recebidos pela coordenadora do laboratório, Profa. Dra. Geilma Lima Vieira, e pelo Prof. Dr. Renato Ribeiro Siman, onde ouviram sobre as pesquisas que estão sendo realizadas atualmente, acompanharam um ensaio de resistência de corpo de prova da construção civil e tiraram dúvidas com relação à atuação dos pesquisadores das áreas da engenharia, conforme mostra a Figura 10.



Figura 10 – Visita dos bolsistas de ICJ ao LEMAC/UFES.

A última parte da visita envolveu o Laboratório de Caracterização Ambiental de Resíduos (LACAR) onde os bolsistas acompanharam o procedimento laboratorial de caracterização para determinação dos elementos metálicos presentes em placas de circuito impresso (PCI), mostrado na Figura 11.



Figura 11 – Visita dos bolsistas de ICJ ao LACAR/UFES.

A visita técnica à UFES (vide Figuras 8 a 11) proporcionou uma experiência única aos bolsistas de ICJ que puderam entrar em laboratórios de pesquisa pela primeira vez e entender como funcionam as pesquisas científicas dentro da universidade.

- **Ensaio de caracterização ambiental**

O ensaio de caracterização ambiental é fundamental para determinar o potencial de reciclagem de qualquer resíduo de equipamento eletroeletrônico. Inicialmente, estava previsto na proposta de projeto a caracterização das placas de circuito impresso coletadas na Etapa 3 (*Workshop* de desmontagem seletiva e categorização de REEE). No entanto, como uma pesquisa de iniciação científica estava em andamento e também envolvia a caracterização ambiental de placas de circuito impresso, decidiu-se por envolver os bolsistas de ICJ nesta pesquisa em andamento, que seria muito mais proveitoso e tinha como objeto de estudo as lâmpadas de LED.

As lâmpadas de LED inservíveis estão valorizadas no mercado de reciclagem por conta de seu potencial de reaproveitamento de metais, reuso e a obrigação da logística reversa (ZHAN *et al.*, 2015). Atualmente, a reciclagem de lâmpadas fluorescentes de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista também desperta interesse quando se leva em conta a quantidade comercializada e descartada a cada ano, porém, com a evolução da tecnologia, há uma tendência das lâmpadas de LED substituí-las gradualmente.

Comparando com as lâmpadas fluorescentes de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista, as lâmpadas de LED apresentam tempo de vida útil de 5 a 8 vezes maior, economizam até 80% no consumo de energia e não apresentam mercúrio em sua composição (INMETRO, 2015).

O potencial de geração de lâmpadas de LED inservíveis acompanha o mercado de lâmpadas de LED que cresceu exponencialmente desde 2001, apresentando uma variedade de aplicações (LIM *et al.*, 2011).

Em projeções feitas pela Secretaria de Eficiência Energética e Energia Renovável dos Estados Unidos, o mercado de lâmpadas de LED irá dominar o comércio de lâmpadas em 84% até 2030, reduzindo o consumo de energia por fontes de luz em até 40% (U.S. DOE, 2014).

Diante do exposto, a caracterização das placas de circuito impresso e os componentes eletrônicos de lâmpadas de LED através da lixiviação ácida com água-régia é apresentada na Figura 12.

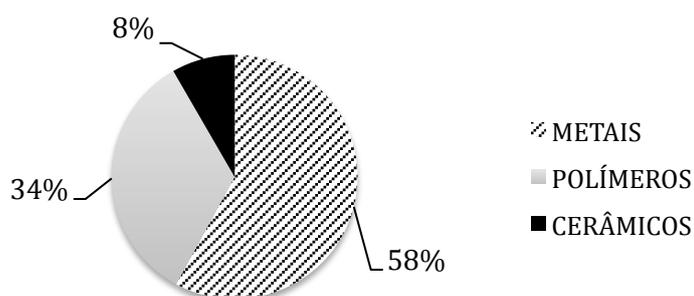


Figura 12 – Composição das PCI e componentes eletrônicos de lâmpadas de LED inservíveis lixiviados em água régia.

Conforme pode ser observado na Figura 12, a fração metálica representou 50% das placa de circuito impresso e componentes eletrônicos, sendo que em média, somente as placas de circuito impresso podem apresentar até 60% em peso de metais segundo Virolainen (2013). Para garantir a solubilização dos metais neste estudo, a metodologia adotada por Park & Fray (2009), na qual a proporção sólido/líquido que demonstrou maior eficiência na lixiviação foi de 1:20 e o tempo de reação de 3 horas, foi modificada, adotando o tempo de reação de acordo com Yamane *et al.* (2011), estudo que também utilizou água régia e a solubilização se mostrou mais eficiente após 24 horas.

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos na análise quali-quantitativa dos metais lixiviados utilizando água régia.

Tabela 5 - Análise quali-quantitativa dos metais lixiviados a partir da PCI.

Metais	Concentração (mg.kg⁻¹)
Alumínio	110.923,00
Antimônio	212,50
Arsênio	66,00
Cério	ND
Cobre	94.492,00
Gálio	ND
Ítrio	ND
Níquel	761,00
Ouro	348,50
Prata	384,00

Conforme observado na Tabela 5, Comparando os resultados obtidos com lâmpadas fluorescentes e incandescentes (LIM *et al.*, 2013; TUNSU *et al.*, 2014) é notável que as lâmpadas de LED possuem um potencial de reciclagem para ouro e prata superior, demonstrando a viabilidade financeira para recuperação destes metais, tomando como exemplo as PCI de computadores, cuja concentração do ouro e prata representam menos de 1% em massa, mas correspondem a 80% do valor intrínseco total (PARK & FRAY, 2009).

Apesar do ouro ser o metal de maior interesse econômico e mais explorado em resíduos de equipamentos eletroeletrônicos, visto que a quantidade de ouro extraído, em 2014, foi de aproximadamente 300t, o que representa 11% da produção global de ouro extraído de minas em 2013 (USGS, 2014), não foram encontrados estudos de reciclagem a partir de lâmpadas de LED.

O alumínio foi o metal mais abundante, sendo obtida a concentração de 110.923mg.kg⁻¹ para a água régia (vide Tabela 5). Este resultado já era esperado, e quando comparados a outros estudos, a presença de alumínio pode ser até 3 vezes maior em lâmpadas de LED, visto que o alumínio pode compor até 10% da fração metálica (LIM *et al.*, 2011; LIM *et al.*, 2013).

Apesar do alumínio não despertar tanto interesse na indústria de reciclagem de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos, devido ao valor de mercado ser menor que o de metais preciosos, a quantidade encontrada nas lâmpadas de LED pode viabilizar sua recuperação.

Estudos de recuperação de cobre a partir de REEE são abundantes na literatura. O cobre, que pode representar até 3% do minério, chega a representar até 21% da massa das PCI, representando assim uma alternativa viável de fonte secundária de metais, além de evitar que as reservas naturais dos metais sejam intensivamente exploradas (CUI & FORSSBERG, 2003; KUMAR, HOLUSZKO, ESPINOSA, 2017).

INDICADORES

Os indicadores de desempenho foram as atividades extra-classe, participação nas dinâmicas, redações, listas de presença e relatórios.

PARCERIAS

Os parceiros deste projeto foram: a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) sob a forma de apoio financeiro (Processo FAPES n°71812830/2015), a empresa de transporte JR Transporte e Turismo Ltda que forneceu gratuitamente o transporte dos alunos para visita técnica à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), o Laboratório de Caracterização Ambiental de Resíduos (LACAR/UFES) coordenado pelo Prof. Dr. Renato

Ribeiro Siman, o Laboratório de Ensaio de Materiais da Construção Civil (LEMAC/UFES) coordenado pela Prof. Dra. Geilma Lima Vieira e o Laboratório de Espectrometria Atômica (LEA/UFES) coordenado pela Profa. Dra. Maria Tereza Weitzel Dias Carneiro Lima.

CRONOGRAMA

Atividade	Trimestres do projeto							
	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º
Palestras para o alinhamento de conhecimento temático	X	X						
Criação do ponto de coleta de REEE e produção de cartazes de divulgação		X						
Campanha de divulgação do ponto de coleta		X	X					
Treinamento de Monitores para o <i>workshop</i> e ensaios de caracterização ambiental			X					
<i>Workshop</i> de desmontagem seletiva e categorização			X	X				
Palestras sobre as diferentes opções de pós-graduação e passos de uma pesquisa científica					X	X		
Palestras sobre práticas laboratoriais						X	X	
Realização de visita técnica							X	
Realização de ensaios de caracterização ambiental							X	
Análise e discussão dos resultados do ensaio de caracterização ambiental								X
Debate com os Bolsistas de ICJ com o relato individual da experiência obtida no projeto								X
Elaboração de Relatório Final								X

REFERÊNCIAS

1. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial - ABDI (Org.). Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos: Análise da Viabilidade Técnica e Econômica. Brasília, 179 f., 2013.
2. BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos.
3. CROWE, M.; ELSER, A; GOPFERT, B.; MERTINS, L.; MEYER, T.; SCHMID, J.; SPILLNER, A.; STROBEL, R. Waste from electrical and electronic equipment (WEEE): quantities, dangerous substances and treatment methods. Copenhagen: Europe Environment Agency, p.80, 2003.

4. CUI, J.; FORSSBERG, E. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review. *Journal of Hazardous Materials*, v. 99, p. 243-263, 2003.
5. GERBASE, A. E.; OLIVEIRA, C. R. Reciclagem do lixo de informática: uma oportunidade para a química. *Química Nova*. vol.35, n.7, p. 1486-1492. 2012.
6. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). Portaria nº 144, de 13 de março de 2015. 2015.
7. KUMAR, A.; HOLUSZKO, M.; ESPINOSA, D. C. R. E-waste: An overview on generation, collection, legislation and recycling practices. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 122, p. 32-42, 2017.
8. LIM, S.; KANG, D.; OGUNSEITAN, O. A. & SCHOENUNG, J. M. Potential Environmental Impacts of Light-Emitting Diodes (LEDs): Metallic Resources, Toxicity, and Hazardous Waste Classification. *Environmental Science and Technology*. vol. 45. p. 320-327. 2011.
9. LIM, S.; KANG, D.; OGUNSEITAN, O. A. & SCHOENUNG, J. M. Potential Environmental Impacts from the Metals in Incandescent, Compact Fluorescent Lamp (CFL), and Light-Emitting Diode (LED) Bulbs. *Environmental Science Technology*. vol.47. p.1440-1447. 2013.
10. NATUME, R. Y.; SANT'ANNA, F.S.P. Resíduos Eletroeletrônicos: Um Desafio Para o Desenvolvimento Sustentável e a Nova Lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos. 3º International Workshop Advanceds in Cleaner Production. São Paulo, Brazil. p.9. 2011.
11. PANAMBUNAN-FERSE, M; BREITER, A. Assessing the side-effects of ICT development: E-Waste production and management: A case study about cell phone end-of-life in Manado, Indonesia. *Technology in Society*. vol. 32, p. 223-231, 2013.
12. PARK, Y. J.; FRAY D. J. Recovery of High Purity Precious Metals from Printed Circuit Boards. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 164, p.1152-1158, 2009.
13. Portal resíduos sólidos. Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos – REEE. Disponível em: <<http://www.portalresiduossolidos.com/residuos-de-equipamentos-eleto-eletronicos-reee/>>. Acesso em: 28/05/2016.
14. REIDLER, N. M. V. L. Resíduos de equipamentos elétrico e eletrônicos em instituições de ensino superior: estudo de caso de diretrizes para a gestão integrada. Tese de Doutorado em Saúde Pública. Faculdade de Saúde Pública da USP. São Paulo. 2012.

15. ROCHA, G. H. T.; GOMES, F. V. B.; PORTE, M. S.; PORTUGAL, S. M.; ALMEIDA, R. N.; RIBEIRO, J. C. J.; Diagnóstico de Geração de Resíduos Eletroeletrônicos no Estado de Minas Gerais. 85 f. 2009.
16. RODRIGUES, A. C. Fluxo domiciliar de geração e destinação de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos no município de São Paulo/SP: caracterização e subsídios para políticas públicas. 246f. Tese (Doutorado) - Departamento de Ciências, Universidade de São Paulo. São Paulo, 247 f., 2012.
17. TROMBINI, F.; GOMES, O. V. O. Reaproveitamento de resíduos de equipamentos eletro-eletrônicos – REEE – uma visão sobre o trabalho dos artesãos e os impactos sobre a saúde e o meio ambiente. Apresentado no IV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Salvador/BA. p. 10. 2013.
18. TUNSU, C., EKBERG, C., RETEGAN. T., Characterization and Leaching of Real Fluorescent Lamp Waste for the Recovery of Rare Earth Metals and Mercury. Hydrometallurgy. Vol.144-145. p. 91-98. 2014.
19. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (U.S. DOE). Energy Savings Forecast of Solid-State Lighting in General Illumination Applications. Navigant Consulting, Inc., Building Technologies Program. n. 68. 2014.
20. USGS. U.S. (United States) Geological Survey. Mineral Commodity Summaries 2014. p. 196. 2014.
21. United Nations University - UNU (Org.). E-waste statistics: Guidelines on classification, reporting and indicators, 52 f. Bonn, 2015.
22. United States Geological Survey (USGS). Mineral Commodity Summaries 2014. p. 196. 2014.
23. VIROLANIEN, S. Hydrometallurgical Recovery of Valuable Metals from Secondary Raw Materials. Doctoral Thesis. Lappeenranta University of Technology, Finlândia, 93p, 2013.
24. YAMANE, L. H.; DE MORAES, V. T.; ESPINOSA, D. C. R. & TENÓRIO, J. A. S. Recycling of WEEE: Characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers. Waste Management, vol. 31, p. 2553-2558, 2011.
25. ZHAN, L., XIA, F.; YE, Q.; XIANG, X. & XIE, B. Novel recycle technology for recovering rare metals (Ga, In) from waste light-emitting diodes. Journal of Hazardous Materials. vol 299, p.388-394. 2015.