

**Risco Ambiental e Biotecnologia na Recuperação de Metais da Placa de Circuito Impresso (PCI)****Environmental Risk and Biotechnology in the Recovery of Metals from the Printed Circuit Board (PCB)**

DOI:10.34115/basrv4n4-026

Recebimento dos originais:02/06/2020

Aceitação para publicação:24/07/2020

**Marcelo Luis Lemos da Silva**

Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental pelo Centro Universitário Estadual da Zona Oeste  
Instituição: Centro de Instrução Almirante Alexandrino da Marinha do Brasil e Escola Técnica  
Estadual Juscelino Kubitschek - ETEJK

Endereço: Rua Jornalista Antônio de Freitas - Jardim América, Rio de Janeiro – RJ, Brasil

E-mail: mluispf@gmail.com

**Carlos Eduardo Antunes de Oliveira**

Mestrando em Ciência e Tecnologia Ambiental pelo Centro Universitário Estadual da Zona Oeste  
Instituição: Centro Universitário Estadual da Zona Oeste - UEZO

Endereço: Avenida Manuel Caldeira de Alvarenga, 1203 – Campo Grande, Rio de Janeiro – RJ, Brasil

E-mail: kaduoliv@hotmail.com

**Rosana da Paz Ferreira**

Doutora em Modelagem Computacional pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Instituição: Centro Universitário Estadual da Zona Oeste - UEZO

Endereço: Avenida Manuel Caldeira de Alvarenga, 1203 – Campo Grande, Rio de Janeiro – RJ, Brasil

E-mail: rosanapazf@gmail.com

**Alexander Machado Cardoso**

Doutor em Química Biológica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

Instituição: Centro Universitário Estadual da Zona Oeste - UEZO

Endereço: Avenida Manuel Caldeira de Alvarenga, 1203 – Campo Grande, Rio de Janeiro – RJ, Brasil

E-mail: amcardosopf@yahoo.com.br

**RESUMO**

O presente artigo tem como objetivo analisar os riscos ao meio ambiente e a recuperação dos metais de Placas de Circuito Impresso (PCI) com o auxílio da biotecnologia, buscando não só a conscientização dos eminentes perigos destes resíduos, mas também as oportunidades que eles oferecem, principalmente por terem os componentes mais valiosos e que ainda não possuem tecnologia em larga escala para o seu processamento.

**Palavras-chaves:** biotecnologia, lixo eletrônico, políticas públicas, risco ambiental.

**ABSTRACT**

This article aims to analyze risks to the environment and the recovery of metals from Printed Circuit Boards (PCB) with the help of biotechnology, seeking not only to raise awareness of the eminent dangers

of these residues, but also the opportunities that they offer, as they have the most valuable components and do not yet have large-scale technology for their processing.

**Keywords:** biotechnology, electronic waste, public policies, environmental risk..

## 1 INTRODUÇÃO

Os Equipamentos Eletroeletrônicos desde o início da década de 50 invadiram as empresas e as nossas residências facilitando nosso dia a dia devido às possibilidades que nos proporcionam. A cada ano são lançados novos aparelhos e os anteriores tornam-se obsoletos sejam por razões funcionais, estéticas ou quaisquer outras, levando seus proprietários ao descarte. Toda essa tecnologia freneticamente atualizada requer a aplicação de matérias-primas para a confecção dos novos produtos, o que vem exaurindo os recursos naturais do planeta. Os equipamentos eletroeletrônicos, em sua maioria, podem ser reutilizados ou reciclados evitando os novos impactos ambientais causados por todas as etapas do seu ciclo de vida. Eles possuem em metais por tonelada, quantidades maiores do que nos minérios extraídos da natureza (WIDMER et al., 2005; CORREA et al., 2020).

Apesar dos inquestionáveis benefícios que a tecnologia nos oferece, os Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) apresentam-se como um grande revés ambiental da atual era tecnológica. Milhões de toneladas de resíduos eletrônicos são geradas no mundo a cada ano. Esses materiais tem como origem os resíduos domésticos, corporativos, industriais e estão presentes até no espaço sideral. O debate sobre os REEE se deve principalmente à transformação da antiga sociedade industrial em uma sociedade de informação com o crescente uso de tecnologias de informação e comunicação (XAVIER et al., 2014, CORREA et al., 2020).

Já a algum tempo nosso país discute a gestão desses resíduos, mais conhecidos popularmente como “lixo eletrônico”. A palavra “lixo” usada para definir tais equipamentos em final de vida é de uso controverso e só ganha sentido para popularizar o tema, visto que esses resíduos possuem alto valor agregado e grande potencial de retorno à produção como matéria prima reciclada, constituindo a economia circular. Os equipamentos eletroeletrônicos não possuem uma vida útil muito longa porque vários modelos e novas tecnologias surgem a cada dia. A ausência de regulamentação quanto à responsabilidade dos diversos atores envolvidos no fluxo desses resíduos até o presente se apresenta como instrumento para que este processo acabe se desenvolvendo de forma caótica, difusa e sem controle. Dentre os motivos para o aumento do descarte estão: (i) defeito, (ii) desgaste, (iii) modismo, (iv) estética, (v) preço, (vi) obsolescência e (vii) falta de conhecimento do proprietário. 75% dos consumidores não sabem o que fazer com os REEE (MIGUEZ, 2012).

Atualmente os REEE são alvo de inúmeras pesquisas científicas e as oportunidades com o tratamento físico, químico ou biológico podem incluir, dentre outras: a reentrada no processo de

fabricação de novos eletrônicos ou a manufatura de outros produtos, como, por exemplo: as medalhas dos jogos olímpicos de Tóquio (Japão) que ocorreriam este ano e foram adiados em virtude da pandemia do novo coronavírus; impressoras 3D; próteses ortopédicas e nanofármacos. O reaproveitamento gera ganhos econômicos, evita a contaminação pelo descarte incorreto e minimiza novos impactos ambientais da extração da matéria prima. Os efeitos dos metais pesados à saúde humana e ao meio ambiente tornam o reaproveitamento uma questão de saúde pública.

O aumento na geração de REEE deve ser visto como um dos mais sérios problemas ambientais da vida contemporânea, refletindo na população e na sobrevivência dos ecossistemas, tendo em vista que os custos de todo o seu ciclo de vida são substanciais e crescentes. O contato com agentes contaminantes no decorrer da cadeia reversa dos equipamentos eletroeletrônicos pode acontecer em diferentes etapas do processo e em diversas intensidades. O contato direto com metais pesados durante a etapa de desmontagem dos aparatos resulta na absorção pela pele e possível contaminação por bioacumulação nos organismos. As fases de coleta e reciclagem apresentam riscos diretamente relacionados ao manuseio dos componentes pesados, infecciosos e cortantes. Existem ainda, os riscos do transporte e exposição a substâncias perigosas durante a reciclagem, principalmente, pela queima de partes plásticas e abertura de monitores que contém chumbo (XAVIER et al., 2014; CORREA et al., 2020).

Os riscos ambientais são causados por agentes físicos, químicos ou biológicos que são capazes de causar danos à saúde do trabalhador em função de sua natureza, concentração, intensidade ou tempo de exposição. O risco ambiental é o risco do descarte inadequado dos REEE que depende da interação do ser humano com o componente para atingir a periculosidade, visto que o risco é gerenciável, o perigo não. Os REEE, quando dispostos na natureza sem um correto tratamento, penetram no solo e contaminam os lençóis subterrâneos de água que ao ser consumida pode causar doenças devido aos metais tóxicos existentes em suas diferentes composições. Mesmo em aterros sanitários, um possível contato dos metais tóxicos com a água, no caso das chuvas, incorre em contaminação do chorume (líquido originado de processos biológicos, químicos e físicos da decomposição de resíduos orgânicos), multiplicando o impacto decorrente de qualquer eventual vazamento (ABDI, 2013). As medidas de prevenção dos resíduos se traduzem com a prática do consumo e produção consciente. Analisando as etapas do ciclo de vida dos equipamentos conseguimos ter uma visão holística dos impactos ao ambiente.

## **2 DESENVOLVIMENTO**

### **2.1 IMPACTOS AMBIENTAIS**

A análise do ciclo de vida (ACV) dos produtos é uma das ferramentas de gestão ambiental mais utilizada para definir os impactos e as ações de prevenção. Segundo Franchetti (2009), ela apresenta uma

visão global e completa que qualifica e quantifica os efeitos ambientais implementando melhorias nesses efeitos. Os estudos de ACV abrangem desde a extração da matéria-prima até sua destinação final, passando pelas etapas de produção, distribuição e consumo. Uma grande contribuição da ACV é identificar onde estão os impactos mais relevantes no ciclo de vida de um produto para buscar alternativas. Segundo Xavier et al. (2014), de um modo geral a ACV abrange as seguintes etapas:

1. Identifica e quantifica o consumo de energia, materiais e geração de resíduos;
2. Avalia o impacto no meio ambiente do consumo de energia, materiais e geração de energia;
3. Identifica e avalia oportunidades para aumentar a eficiência nos processos de fabricação; distribuição; tratamento e disposição final de resíduos; e produtos de pós-consumo, além da redução de custos.

O impacto ambiental é uma mudança no meio ambiente que é causada graças à atividade do ser humano. Esse impacto pode ser positivo ou negativo, sendo que o negativo representa uma quebra no equilíbrio ecológico, que provoca graves prejuízos no meio ambiente. De acordo com o Art. 1º da Resolução do CONAMA nº 001/86, impacto ambiental é qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente causada pelos seres humanos que, direta ou indiretamente, afeta a saúde, a segurança e o bem estar da população, as atividades sociais e econômicas e o meio ambiente (MMA, 1986).

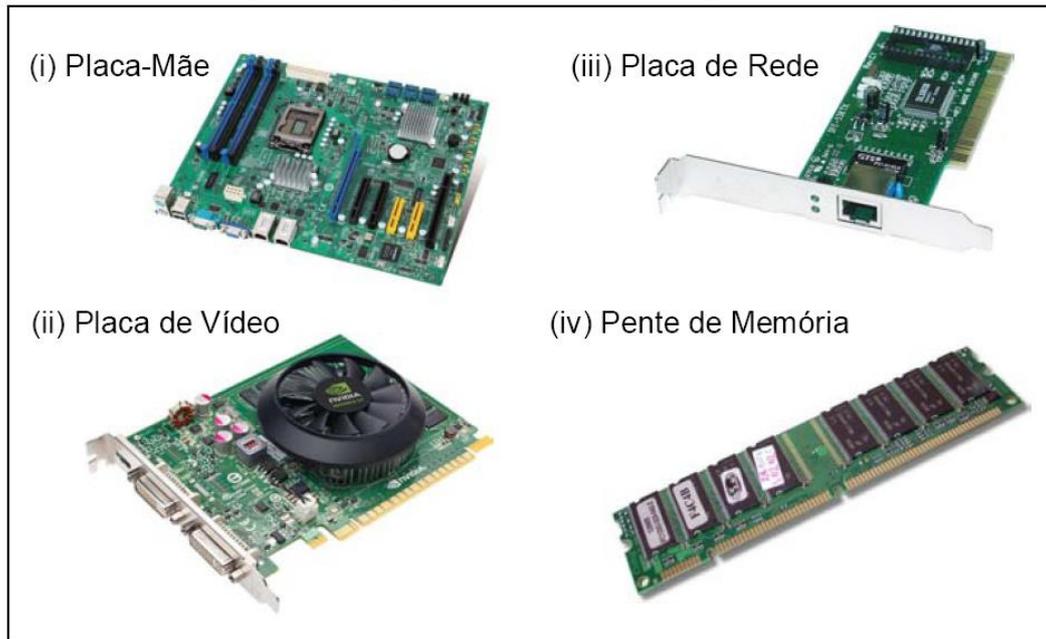
A fim de evitar excessos e prevenir grandes impactos, medidas mitigatórias podem ser tomadas em todas as fases do ciclo de vida, a fim de compensar ações pouco sustentáveis do processo. Como exemplos, temos a construção de equipamentos utilizando materiais recicláveis, a utilização de menos substâncias tóxicas na fabricação, a utilização de veículos híbridos na distribuição do produto e a conscientização do consumidor quanto aos padrões sustentáveis de consumo. O reaproveitamento dos REEE como matéria prima ou o reuso dos equipamentos, principalmente os da linha verde teria ação direta na diminuição desses impactos.

Outras medidas que visam diminuir o impacto são as medidas compensatórias. Estas são tomadas quando o meio já sofreu o impacto negativo e, normalmente, são realizadas em um local diferente daquele em que o ambiente foi afetado. O reflorestamento é uma medida de compensação ao desmatamento que, nem sempre, ocorre no mesmo momento ou na área devastada, por exemplo.

## 2.2 A PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO (PCI)

As placas de circuito impresso ou simplesmente PCIs estão presentes em praticamente todos os equipamentos da indústria eletroeletrônica, sendo importantes componentes dos computadores. Como exemplos das PCIs de computadores podemos citar: (i) Placa-Mãe, (ii) Placa de Vídeo, (iii) Placa de Rede e (iv) Pente de Memória (Figura 1).

Figura 1. Exemplos de Placas de Circuito Impresso (PCI).



Segundo Gerbase e Oliveira (2012), o material que compõe a base da placa (chamado de laminado) pode ser de diferentes composições como, por exemplo, fenolite (papelão impregnado com uma resina fenólica), fibra de vidro, composite (mistura de resina fenólica com a fibra de vidro) e materiais cerâmicos. Os componentes eletrônicos são montados sobre uma fina camada de cobre e as conexões entre eles ocorrem através de caminhos condutores, também chamados de barramentos.

Segundo Miguez (2012), as partes mais lucrativas para reciclagem são as placas e circuitos elétricos. O processo de retirada dos metais valiosos presentes nas PCIs, como ouro, paládio, platina e prata, não é simples e requer tecnologia e conhecimento apropriados, sendo que a maioria das empresas que detêm essa tecnologia está localizada na Europa (XAVIER et al., 2014).

A reciclagem de lixo eletrônico é interessante devido aos equipamentos eletrônicos apresentarem em sua composição várias frações de materiais valiosos, sendo que a maioria destes está presente nas placas de circuito impresso. As tecnologias usadas para reciclagem dessas sucatas incluem processos mecânicos, químicos, térmicos ou biológicos. Os processos mecânicos ocorrem na fase inicial para separar previamente os metais, polímeros e cerâmica através das etapas de cominuição, classificação e separação. Além dos, ou após os, processos mecânicos, temos ainda a Pirometalurgia (que utiliza altas temperaturas), a Hidrometalurgia (que envolve a dissolução do material em soluções lixiviantes e onde pode haver o uso de biotecnologia gerando a biohidrometalurgia) e a Eletrometalurgia (através da eletrólise) (PARK et al., 2009).

A composição de uma PCI é variada e, se descartada de forma inadequada no ambiente, pode causar sérios riscos à saúde humana devido a apresentar componentes prejudiciais a saúde. Gerbase e

Oliveira (2012) propuseram uma média de 28% de metais, 19% de Plásticos, 4% de Bromo e os 49% restantes de materiais cerâmicos, vidros e óxidos. As quantidades médias dos metais encontrados em uma Placa de Circuito Impresso são para Cobre: 14%, Ferro: 6%, Níquel: 2%, Zinco: 2%, Estanho: 2%, Prata: 0,3%. Ouro: 0,04%, Paládio: 0,02%.

Há dificuldade na separação de alguns metais pela quantidade e porque eles ficam presos junto com materiais poliméricos e cerâmicos, variando também devido ao ano de fabricação do equipamento, modelo e tipo. Os metais das PCIs podem ser separados em três grupos: (i) metais preciosos: ouro, prata, paládio e platina; (ii) metais base: cobre, alumínio, níquel, estanho, zinco e ferro; e (iii) metais tóxicos: mercúrio, berílio, índio, chumbo, cádmio, arsênio e antimônio (RIBEIRO, 2013).

A concentração de materiais valiosos é significativa pois, segundo Fogarasi e colaboradores (2014), enquanto que uma tonelada do minério de ouro possui de 6-12g do metal, 1 tonelada de REEE de PCI possui 17g de ouro. Localizada no noroeste de Minas Gerais na cidade de Paracatu, a Mina Morro do Ouro é a maior mina de ouro do País em atividade e a maior do mundo a céu aberto, de onde são extraídas 0,4 g de ouro por tonelada de minério.

Devido à proximidade da cidade pela expansão da mineradora, alguns cientistas relacionam os efeitos do metal Arsênio liberado pela empresa na mineração a casos de câncer da população. Segundo o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), 40 celulares possuem a mesma quantidade de ouro que uma tonelada de minério. Na china são desperdiçados por ano 4 t de ouro (Au), 6 t de cobre (Cu) e 28 t de prata (Ag).

Já segundo a Umicore, multinacional da Bélgica, que atua no ramo de reciclagem com filiais no Brasil, existem de 150-200g de ouro por tonelada de PCI. Nos telefones celulares, são de 250 a 300 gramas de ouro por tonelada. O processo de recuperação de metais nobres contidos em resíduos é conhecido como Mineração Urbana. Segundo Gerbase e Oliveira (2012), as placas de circuito impresso são trituradas e exportadas para outros países, tais como Canadá, Bélgica e Cingapura. O refino dos metais não é feito no Brasil, pois necessita alto investimento financeiro e uma grande quantidade de sucata para se tornar economicamente viável. Levando-se em conta todo o custo de extração e o custo da disposição final no aterro, as vantagens econômicas da reciclagem crescem para além das ambientais e sociais, podendo se tornar também um importante indicador de saúde pública.

### 2.3 O METAL NOBRE OURO (AU)

O ouro, símbolo químico Au, do latim “aurum” (brilhante) é um elemento químico que está situado no grupo onze (IB) da tabela periódica, de número atômico 79 e massa atômica 196,96657u. É o metal precioso conhecido mais antigo. É um dos metais mais valiosos com indícios de historiadores de que o homem manipula desde 5.000 a.C. Fundido com outros metais, tornou-se a primeira moeda e

símbolo de valor que permanece até hoje no conceito de economia humana (JANSEN, 2008). Ele está presente em toda a parte da natureza, porém em concentrações ínfimas, como exemplo, nas águas do mar que contêm cerca de 1 Kg de ouro a cada 8,3 bilhões de litros e no corpo humano com 0,2 mg, onde a maior parte encontra-se nos ossos e sangue. Outras características do ouro são:

- É o investimento mais seguro, pois tende a se valorizar eternamente;
- É utilizado em eletrônicos, jóias, comidas, bebidas e medicamentos;
- É um metal excepcionalmente macio (pode ser moldado com as mãos), maleável, sendo porém muito denso. 30cm<sup>3</sup> de Au pesam cerca de 0,5 tonelada. Com 1g de Au é possível obter um fio (70 µm) de 3 Km de extensão;
- A Unidade de Pureza é o Kilate (K), sendo o mais puro o ouro 24K;
- Além do clássico ouro amarelo, existem ainda o ouro rosa (75% Au, 22,5% Cu e 2,5% de Ag), branco (75% de Au, 12,5% de Ag e 12,5% de Pd), azul (75% de Au, 12,5% de Ag e 12,5% de Zn), verde (75% de Au, 15% de Ag, 6% de Cu e 4% de Cd), vermelho (75% de Au e 25% de Cu) e o ouro negro (75% de Au e 25% de Co).
- O homem até hoje descobriu apenas 160 mil toneladas de ouro do solo o que caberia em uma casa com 4 quartos;
- As medalhas de ouro dos jogos olímpicos possuem apenas 6g de ouro;
- Existe somente um isótopo estável do ouro (Au-197), porém existem 18 radioisótopos, sendo o Au-195 o mais estável com uma meia-vida de 186 dias. O isótopo de ouro Au-198, com meia-vida de 2,7 dias é usado em alguns tratamentos de câncer e em outras enfermidades;
- O Brasil possui 1,9% das reservas sendo a 10<sup>a</sup> maior do mundo;
- A maior mina de ouro do mundo fica na África do Sul (mesmo continente onde existem os maiores cemitérios de Lixo Eletrônico do mundo). Nela são extraídos o equivalente a metade do ouro do planeta;
- As atuais reservas de ouro vão durar apenas pelas próximas duas décadas.

O ouro conquistou “status” de realeza, pureza, ostentação, coroação, premiação reconhecimento para quem chegar primeiro em algum lugar ou posição e religiosidade. Por ser durável e imutável através dos tempos, é utilizado em muitos artefatos religiosos simbolizando o caráter imutável de Deus. Por ser tão raro e um investimento considerado como o mais seguro, o ouro possui um alto valor comercial e esse valor está em constante mudança já que, assim como as moedas estrangeiras, possui preço cotado diariamente. Além dos equipamentos eletrônicos, o ouro também é utilizado em brinquedos, alimentos, bebidas, jóias, medicamentos e tratamentos médicos conhecidos como crisoterapia. A nanotecnologia

com ouro ajuda na detecção de doenças em estágios iniciais como o câncer e a diabetes. Cabe destacar que o ouro não é o melhor condutor elétrico. A prata é o elemento de melhor condução seguida pelo cobre e, então, pelo ouro. Alguns miligramas de ouro são utilizados na galvanização dos contatos eletrônicos por sua resistência à corrosão e porque para fios finos é necessário utilizar elemento mais dúctil possível. O cobre não é tão dúctil quanto o ouro, o que ocasionaria uma espessura bem maior deste metal e também uma corrosão maior caso fosse utilizado em seu lugar (JANSEN, 2008).

Os metais nobres, como o ouro, a prata e outros, para serem trabalhados, levam uma liga de outros metais para os tornarem mais resistentes e possíveis de utilizar no dia a dia. O fato dos metais nobres estarem ligados significa que o seu grau de pureza diminui de acordo com a quantidade de liga que levar: 24K é o ouro mais puro, significa que se dividirmos em 24 partes, 24 serão de ouro (99,9% puro); ouro 18K, se dividirmos em 24 partes, 18 serão de ouro (75% puro) e ouro 14K, se dividirmos em 24 partes, 14 serão de ouro (58% puro). Para uso pessoal, um anel ou aliança não são fabricados em ouro puro, pois não resistiriam aos efeitos mecânicos do dia a dia onde um simples aperto de mão poderia deformar uma aliança de espessura normal. O ouro dificilmente sairá dos eletrônicos e 99% do ouro presente, é reciclável (XAVIER et al., 2014).

A quantidade de ouro nos equipamentos eletroeletrônicos é pequena e exige tecnologia de ponta para separar os metais preciosos do plástico e das resinas que formam os componentes eletrônicos. O ouro geralmente é encontrado em pequenos fragmentos (pepitas) incrustados em rochas e no solo, cuja mineração causa um grande impacto nas condições ecológicas, do ponto de vista físico e químico, pelo despejo de cianeto e mercúrio no ambiente. A movimentação de terra é enorme, pois, a média de ocorrência é de 5 gramas de ouro por 1.000 toneladas do substrato (XAVIER et al., 2014).

Mas, a extração e os ganhos estão sendo à custa dos ecossistemas. Os desmatamentos foram estimados em 1.600 Km<sup>2</sup>, entre 2007 e 2013, da ordem de 4 vezes mais nos últimos 6 anos. A conta do desmatamento já está sendo apresentada para ser paga, com a falta de umidade promovida por remoção da vegetação e por outras causas, como queimadas, que promovem o aumento do aquecimento da terra (mudanças climáticas) e outros eventos climáticos naturais. Os rios de nuvem (cursos d'água atmosféricos) diminuem e comprometem a precipitação de água para uso humano e as atividades econômicas (JANSEN, 2008; XAVIER et al., 2014).

A mineração urbana é a reciclagem de materiais de valor presentes em resíduos eletrônicos, como ouro, prata, cobre, platina, alumínio, aço, terras raras e até mesmo plástico. É uma atividade muito pouco difundida na América Latina, mas que na Europa, no Japão e na Coreia do Sul está se transformando em um importante gerador de emprego e riqueza, comparável até à mineração tradicional. Uma forma de reduzir a demanda global por ouro e todos os impactos ambientais do ciclo de extração é a sua recuperação dos REEE pelo processo conhecido como biomineração (JOHNSON, 2014).

## 2.4 BIOTECNOLOGIA E BIOMINERAÇÃO

A biotecnologia é uma área interdisciplinar que integra a química, engenharia e a microbiologia em seus diversos setores, para aplicar as capacidades de agentes biológicos na resolução de problemas e criação de produtos úteis para a humanidade seja na área de saúde, indústria ou processos relativos ao meio ambiente (ALQUERES et al., 2007). A convenção sobre diversidade biológica, assinada durante a conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento realizada na cidade do Rio de Janeiro, no período de 5 a 14 de junho de 1992 (conhecida como ECO 92) definiu Biotecnologia como “Qualquer aplicação tecnológica que utilize sistemas biológicos, organismos vivos, ou seus derivados, para fabricar ou modificar produtos ou processos para utilização específica”.

A reciclagem de REEE tem importância ambiental e econômica pelo potencial de recuperar componentes reutilizáveis onde a humanidade já gastou tempo, dinheiro e o ambiente para segregar, em especial os metais nobres, como, por exemplo, o ouro, gerando empregos para a população e ajudando na erradicação da pobreza. Favorece ainda a minimização de consumo dos recursos naturais, aumenta a vida útil dos aterros e inaugura horizontes sustentáveis na produção dos EEE.

O uso da biotecnologia na substituição dos processos existentes torna muitas destas indústrias mais eficientes e ambientalmente corretas, contribuindo de diversas formas para a sustentabilidade industrial. Esta mudança de paradigma passa por diferentes áreas, desde as mais conhecidas como a farmacêutica e a agrícola, e as áreas embrionárias como a biomineração de resíduos. A biotecnologia poderá desempenhar um papel vital ao promover processos industriais mais limpos, por exemplo, reduzindo a poluição e o consumo de matérias-primas. Quando desenvolvida a seu potencial pleno, a biotecnologia industrial poderá ter um impacto maior sobre o mundo do que a biotecnologia da saúde humana ou da agricultura. Segundo um estudo recente da OCDE intitulado “The Bioeconomy to 2030: designing a policy agenda”, estima-se que as aplicações industriais da biotecnologia em 2030 serão responsáveis por 39% do valor econômico gerado pela Biotecnologia, o que ilustra o forte investimento em investigação e desenvolvimento expectável nesta área (ALQUERES et al., 2007).

O processo pelo qual organismos vivos produzem minerais (sólidos), muitas vezes para endurecer ou tornar rígidos tecidos existentes, como por exemplo, os ossos, é um fenômeno conhecido por biomineralização. Todos os seis reinos taxonômicos incluem membros capazes de formar minerais e mais de 60 minerais foram identificados em organismos. Este processo acontece também quando utilizamos microorganismos na preparação de solo. Um minério é um mineral que possui valor econômico, como o ouro por exemplo. A utilização de microorganismos para mineração proporciona uma maneira mais sustentável de extração dos metais. A biomineração é executada na prática por um processo que envolve microorganismos na lixiviação de metais e conhecido como biolixiviação ou biohidrometalurgia (JOHNSON, 2014).

É um processo biotecnológico já implementado “in loco” principalmente em minas de cobre onde os microorganismos substituem tratores e caminhões, sendo usados diretamente para extração de minério, visto que, encontram nestes minerais suas principais fontes de subsistência. Atualmente, a biolixiviação apresenta aproximadamente 20% da extração mundial de metais, a qual está sendo empregada em cerca de 20 minas do mundo. Países como Chile, Peru, Austrália, EUA e China, dentre outros, aplicam a biolixiviação pra recuperação de cobre, ouro, urânio e zinco. Este processo se destaca perante a mineração tradicional pelos baixos custos de investimentos e de operação, incluindo energia, economia de insumos utilizados em processos hidrometalúrgicos convencionais, não geração de gases tóxicos e por tornar ambientalmente mais aceita a mineração (JOHNSON, 2014).

A lixiviação é um processo que permite a transferência de metais presentes em minérios e em sucatas de equipamentos eletroeletrônicos utilizando como agente lixiviante soluções ácidas, alcalinas e salinas. A desvantagem da biolixiviação está relacionada ao tempo que, em geral, leva semanas. O método de tratamento de resíduos eletroeletrônicos que envolve a reciclagem e recuperação de materiais podem ser resumidos em três estágios: pré-tratamento/desmontagem com a separação seletiva dos componentes tóxicos e outros materiais, beneficiamento (separação e concentração) com a utilização de processos físicos e/ou metalúrgicos para concentrar os materiais e refino físico/químico que é o último estágio no qual os materiais são recuperados (XAVIER et al., 2014; CORREA et al., 2020).

Quanto menor for a partícula, melhor será a extração de minerais pela biolixiviação, pois um número maior de sítios de reação estará exposto para uma mesma massa total de partículas. Vários tipos de bactérias, fungos e algas têm seu habitat em depósitos minerais. A maioria dos organismos presentes são procariontes e muitos de variedade filogenética dos domínios Bactéria e Archaea. A biolixiviação como qualquer outro processo que utiliza microorganismos é influenciada por diversos fatores como tempo de contato, tamanho das partículas, composição do mineral, temperatura, disponibilidade de O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>, pH, pressão osmótica, disponibilidade de nutrientes, carbono e presença de metais tóxicos. Esses fatores podem afetar o crescimento e a eficiência das bactérias no processo de biolixiviação (JOHNSON, 2014; XAVIER et al., 2014; CORREA et al., 2020).

### **3 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Com a intensificação dos processos de industrialização e a chegada da era tecnológica, o Brasil foi tomado por uma onda de produção e consumo que resultou em um aumento na quantidade e diversificação dos resíduos sólidos. A lógica do consumo influencia diretamente nossos padrões em direção ao excessivo e ao supérfluo, incentivando o desejo de substituir um determinado bem por outro mais moderno assim que disponível no mercado.

O consumo em sua essência é uma necessidade existencial. A mudança passa por uma

transformação cultural e de comportamento contemporâneo onde o consumo passa a ser considerado a afirmação de uma identidade ainda não encontrada. O avanço da tecnologia, principalmente nos eletrônicos da linha verde, é um incentivo ao consumo, ocultando padrões de obsolescência. O consumo é uma atividade inerente ao ser humano a fim de satisfazer suas necessidades, não devendo, contudo, ser uma finalidade na vida. O consumismo (consumo exagerado) que é baseado em valores estranhos à necessidade funcional, como por exemplo, moda, publicidade, impulsão, ostentação, carência psicológica, etc., trás inúmeros impactos ao meio ambiente, visto que estimula todo o processo de produção, exaustão dos recursos naturais e aumento do número de resíduos ao final da cadeia.

Com relação aos eletrônicos, a alteração nos padrões de produção e consumo e o reconhecimento da responsabilidade pós-consumo tornam-se essenciais para a manutenção das vidas das presentes e das futuras gerações, notadamente no segmento dos eletrônicos, muitas vezes marcados por práticas de obsolescência programada ou planejada. A necessidade do consumo de computadores e similares carece de um conhecimento ou orientação pelo comprador daquilo que é necessário e uma previsão dos recursos que serão efetivamente utilizados por ele. A partir de critérios de uso e na instalação de programas, pode-se estender o tempo de vida útil de um equipamento atendendo às suas obrigações. Na busca pelo equilíbrio e novas formas de manter o padrão de ganho econômico das empresas, caminham os novos padrões de responsabilidade ambiental indicados pelos clientes que procuram produtos de maior durabilidade, fáceis de consertar e reciclar e, principalmente, com menos produtos tóxicos em sua formulação. A biomineração de metais preciosos presentes nas PCIs é algo promissor e graças ao avanço da biotecnologia, metagenoma e bioinformática será em um futuro próximo realidade em nosso país.

### **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Fundação Carlos Chagas Filho de Apoio à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo apoio financeiro e à equipe da UEZO e ETEJK pelas discussões.

**REFERÊNCIAS**

- ABDI - Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. Logística reversa para o setor de medicamentos. Brasília: ABDI, 2013. Disponível em: <https://www.abdi.com.br/>
- ALQUÉRES, S.M.; ALMEIDA, R.V.; CLEMENTINO, M.M.; VIEIRA, R.P.; ALMEIDA, W.I.; MARTINS, O.B.; CARDOSO, A.M. Exploring the Biotechnological Applications in the Archaeal Domain. *Brazilian Journal of Microbiology (Impresso)*, v. 36, p. 398-405, 2007.
- CORREA, J.T.M.; WERNER, L.; DE BARCELLOS, MARCIA D. Waste electrical and electronic equipment: risks and opportunities under a sustainable perspective. *Revista de administração da UFSM*, v. 13, p. 296-312, 2020.
- FOGARASI, S.; IMRE-LUCACI, F.; IMRE-LUCACI, A. ILEAA, P. Copper recovery and gold enrichment from waste printed circuit boards by mediated electrochemical oxidation. *Journal of Hazardous Materials*. v. 273, p. 215-221, 2014.
- FRANCHETTI, M.J. *Solid Waste Analysis and Minimization: A System Approach*. New York, 2009. Publisher: McGraw Hill. ISBN: 978-0071605243.
- GERBASE, A.E.; OLIVEIRA, C.R. Reciclagem de lixo de informática: uma oportunidade para a química. *Química Nova*, v. 35, n. 7, p. 1486-1492, 2012.
- JANSEN, M. The chemistry of gold as an anion. *Chemical Society Reviews*. 37:1826–1835, 2008.
- JOHNSON, D.B. Biomining—biotechnologies for extracting and recovering metals from ores and waste materials. *Current Opinion in Biotechnology*. 30:24–31, 2014.
- MIGUEZ, E. C. Logística reversa como solução para o problema do lixo eletrônico: benefícios ambientais e financeiros. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2012.
- MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Conselho Nacional do Meio Ambiente. CONAMA. Resolução CONAMA nº 01, de 23 de janeiro de 1986. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para o Relatório de Impacto Ambiental - RIMA. Disponível em: <http://www.mma.gov.br>, 1986
- PARK, Y.J., FRAY, D.J. Recovery of high purity precious metals from printed circuit boards. *Journal of Hazardous Materials*, n. 164, p. 1152-1158, 2009.
- WIDMER, R.; OSWALD-KRAPF, H.; SINHA-KHETRIWAL, D.; SCHNELLMANN, M.; BONI, H. Global perspectives on e-waste. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 25, n. 5, p. 436-458, 2005.
- XAVIER, L.H.; CARVALHO, T.C. (orgs) *Gestão de resíduos eletroeletrônicos: Uma abordagem prática para a sustentabilidade*. 1 ed. – Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 240 p.