



Prospecção Tecnológica da recuperação de metais de valor agregado oriundos de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos por Biometalurgia

João Henrique Pires de Almeida Moraes da Silva

Projeto Final de Curso

Orientadores

Prof^a Bettina Susanne Hoffmann, D.Sc.
Prof^a Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco, D.Sc.

Janeiro de 2020

Prospecção Tecnológica da recuperação de metais de valor agregado oriundos de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos por Biometalurgia

João Henrique Pires de Almeida Moraes da Silva

Projeto Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado por:

Flávia Chaves Alves, D.Sc.

Claudia Magalhães Khair Cunha, Eng.

Orientado por:

Prof^a Bettina Susanne Hoffmann, D.Sc.

Prof^a Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Janeiro de 2020

Ficha Catalográfica

Silva, João Henrique.

Prospecção Tecnológica da recuperação de metais de valor agregado, oriundos de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos por Biometalurgia/ João Henrique Pires de Almeida Moraes da Silva. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2020.

ix, 67 p.; il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2020.

Orientadores: Bettina Susanne Hoffmann e Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco.

1. Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos. 2. Biometalurgia. 3. Prospecção tecnológica. 4. Monografia. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Bettina Susanne Hoffmann e Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco. I. Prospecção Tecnológica da recuperação de metais de valor agregado oriundos de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos por Biometalurgia.

Dedicatória

Aos familiares, amigos e a todos que fizeram parte da minha caminhada até aqui. É no próximo que encontro a força e o propósito necessários para buscar o melhor de mim mesmo diariamente.

Citação

“A lógica vai levar você de A à B.
A imaginação vai levar você para qualquer lugar.”
Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus e minha família, em especial aos meus avós, Eny, Álvaro, Lourdes e Décio, que ajudaram muito na minha formação e a me tornar a pessoa que sou hoje, além de meus pais, Ana Cristina e Paulo Cesar por terem me dado a oportunidade de chegar até aqui, com o melhor que puderam oferecer para mim em tudo na minha vida. Agradeço ao apoio dado desde sempre por minha irmã Ana Luiza, que me ensinou muitas coisas e é minha grande amiga, por Carmem Guedes, mulher de meu pai, pela amizade e companheirismo e por minha namorada Juliana Oliveira, que é um exemplo para mim e a pessoa que mais amo. Dedico este trabalho a eles, tendo em vista que sem o incentivo de todos os citados, provavelmente eu não teria conseguido finalizar esta etapa. Agradeço também aos meus amigos mais próximos, em especial aos que estudaram comigo no Colégio Pedro II e na graduação da UFRJ, pela força que compartilhamos ao longo do tempo e também aos amigos que fiz ao longo da minha experiência profissional nos estágios que realizei. Sem dúvida foram relações que me trouxeram muito aprendizado e ótimos momentos, que levarei por toda a vida. Agradeço também às minhas orientadoras Susanne Hoffmann e Elen Beatriz, por todo o apoio durante este trabalho e por todo o aprendizado durante minha formação como Engenheiro Químico na UFRJ, que sem dúvida contribuíram com meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Resumo do Projeto Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Prospecção Tecnológica da recuperação de metais de valor agregado oriundos de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos por Biometalurgia

João Henrique Pires de Almeida Moraes da Silva

Janeiro, 2020

Orientadores: Prof^a Bettina Susanne Hoffmann, D. Sc.

Prof^a Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco, D. Sc.

A cada ano a quantidade de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos gerados aumenta, tendo em vista que a sociedade passa por uma revolução em decorrência do desenvolvimento da tecnologia da informação e comunicação. Estes resíduos contêm em seus componentes algumas substâncias tóxicas, mas também possuem em sua constituição metais valiosos e de aplicação em produtos de alta tecnologia, que podem ser reciclados gerando um impacto positivo na economia e no meio ambiente. Entretanto, as tecnologias convencionais de reciclagem de metais valiosos provenientes de recursos secundários, que são a pirometalurgia, hidrometalurgia e eletrometalurgia geram significativos impactos ambientais negativos. Recentemente as técnicas de recuperação de metais biometalúrgicas, que utilizam microrganismos no processo, são vistas como uma alternativa mais ecológica para a recuperação destes metais de interesse. No presente trabalho foi realizada a prospecção tecnológica da recuperação de metais valiosos presentes em resíduos de equipamentos eletroeletrônicos, por meio de uma análise de patentes, com busca realizada na plataforma Espacenet do Escritório Europeu de Patentes. Ao tratar e organizar os dados dos documentos de patente encontrados no programa Excel, foi possível realizar uma análise da evolução temporal de publicações, depósitos por região, principais instituições depositantes, principais símbolos da Classificação Internacional de Patentes encontrados, bem como uma análise das principais invenções e vertentes tecnológicas. Isso permitiu a constatação do aumento no interesse do desenvolvimento tecnológico em biometalurgia no período entre 2011 - 2019, com protagonismo chinês e com grande participação de universidades nas inovações, além da maior aplicação das técnicas de biolixiviação e biossorção.

ÍNDICE

1. Introdução	1
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos – Definição, Classificação e Principais Componentes	3
2.2. Materiais Críticos e de Valor Agregado	7
2.3. Mineração Urbana e Economia Circular	10
2.4. Tecnologias de Reciclagem de metais presentes em REEE	11
2.4.1. Tecnologias Biometalúrgicas para a Recuperação de Metais	14
2.4.1.1. Tecnologia de Biolixiviação	15
2.4.1.2. Tecnologia de Biossorção	18
2.4.1.3. Outras Técnicas Biometalúrgicas	21
3. Metodologia	24
3.1. Prospecção Tecnológica	24
3.2. Análise de Patentes	24
3.2.1. Definição da Base de Dados	26
3.2.2. Busca por Patentes	27
3.2.3. Tratamento de Dados e Análise dos Resultados	28
4. Resultados e Discussão	30
4.1. Base de Dados Escolhida	30
4.2. Busca de Patentes	30
4.3. Tratamento de Dados e Análise de Resultados	39
4.3.1. Análise das famílias de patentes por ano e região de depósito	41
4.3.2. Análise das regiões potencialmente protegidas	43
4.3.3. Análise das principais instituições depositantes de patentes	45
4.3.4. Análise da Classificação IPC	48
4.3.5. Análise das principais vertentes tecnológicas	52
5. Conclusão	59
Referências Bibliográficas	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Produtos contendo metais raros e preciosos em minas urbanas.....	8
Figura 2 - Fluxograma do processo tradicional de recuperação de metais raros e preciosos de resíduos eletrônicos e catalisadores usados.....	12
Figura 3 – Interações entre o micróbio e o metal em diversos mecanismos de solubilização e imobilização de metais na recuperação biológica.....	15
Figura 4 – Representação da biolixiviação de minérios primários e de recursos secundários (REEE).....	16
Figura 5 - Representação da bioissorção e seus diversos aspectos.....	19
Figura 6 - Bioissorção e dessorção de metais por microrganismo.....	20
Figura 7 - Esquema de Sistema Bioeletroquímico de câmara dupla usado para recuperar metais.....	22
Figura 8 - Resultados da busca inicial de patentes com referência aos REEE.....	31
Figura 9 – Número de documentos de prioridade das famílias de patentes encontradas por ano.....	41
Figura 10 – Número de documentos de prioridade acumulados ao longo do tempo.....	41
Figura 11 - Distribuição de depósito dos documentos de prioridade.....	42
Figura 12 - Regiões onde as tecnologias pesquisadas estão potencialmente mais protegidas.....	44
Figura 13 - Perfil das instituições depositantes das patentes.....	45
Figura 14 - Depositantes por país de origem.....	48
Figura 15 – Distribuição das técnicas biometalúrgicas nas patentes encontradas.....	52
Figura 16 - Distribuição de vertentes biometalúrgicas por famílias de patentes com documentos concedidos ou publicados.....	53
Figura 17 - Evolução na publicação de documentos de prioridade por técnica biometalúrgica ao longo do tempo.....	54
Figura 18 - Processo de utilização conjunta de técnicas de biolixiviação e recuperação bioeletroquímica de metais presentes em REEE.....	57

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de EEE de acordo com o Anexo IV da Diretiva do Parlamento Europeu	4
Tabela 2 - Exemplos de metais críticos para a União Europeia contidos em componentes de REEE	9
Tabela 3 - Etapas do mapeamento de patentes	26
Tabela 4 – Palavras-chave utilizadas na busca inicial de patentes com referência aos REEE	30
Tabela 5 – Resultados da busca abrangente de patentes que fazem referência aos REEE	32
Tabela 6 – Resultados das buscas de patentes com referência aos REEE e à reciclagem ou recuperação de metais.....	33
Tabela 7 – Resultados da busca abrangente de famílias de patentes com referência aos REEE e à reciclagem ou recuperação de metais	34
Tabela 8 – Resultados da busca de famílias de patentes com referência aos REEE, à reciclagem ou recuperação de metais e às técnicas de biometalurgia	35
Tabela 9 – Resultados da busca abrangente de famílias de patentes com referência aos REEE, à reciclagem ou recuperação de metais e às técnicas de biometalurgia	36
Tabela 10 – Resultados da busca de famílias de patentes com referência aos REEE, à reciclagem ou recuperação de metais e às técnicas de biometalurgia em campos de busca mais relevantes	37
Tabela 11 – Resultados da busca abrangente de famílias de patentes com referência aos REEE, à reciclagem ou recuperação de metais e às técnicas de biometalurgia em campos de busca mais relevantes	38
Tabela 12 - Patentes descartadas da análise	39
Tabela 13 – Relação das patentes analisadas e status de seus documentos.....	40
Tabela 14 - Grupos IPC mais recorrentes entre as patentes analisadas.....	49
Tabela 15 - Classificação das seções, classes e subclasses principais da análise de patentes	50
Tabela 16 - Grupos da Subclasse C22B da classificação IPC encontrados na busca de patentes realizada	51

1. Introdução

Com o crescimento acelerado da chamada sociedade global da informação, caracterizada pelo número crescente de usuários de equipamentos elétricos e eletrônicos (EEE) e rápidos avanços tecnológicos, uma das consequências é a quantidade crescente na geração de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE). Dentre os principais fatores que contribuem com o aumento na geração de REEE, é possível citar o fato dos ciclos de substituição de aparelhos eletroeletrônicos ser cada vez mais curto (caso de celulares, notebooks e outros dispositivos), o crescimento do poder de comprar da classe média global, bem como da demanda de EEE nos países em desenvolvimento, além de muitas pessoas possuírem atualmente mais de um dispositivo de tecnologia da informação e comunicação. A geração mundial de REEE no ano de 2016 foi estimada em 44,7 milhões de toneladas, equivalente a 6,1 kg por habitante, sendo a previsão até 2021 é de que esse valor aumente para 52,2 milhões de toneladas e 6,8 kg por habitante, respectivamente (BALDE et al., 2017).

Diversos metais raros e preciosos estão presentes em minas urbanas, em especial na forma de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos e seus componentes, entre eles, prata, ouro e paládio em placas de circuito impresso, lítio e cobalto em baterias de íons de lítio usadas, além de índio em monitores de LCD. Em alguns casos, a recuperação de metais presentes em minas urbanas é mais vantajosa economicamente do que sua extração em minas convencionais, além da vantagem do ponto de vista ambiental. Com isso, é de grande importância a recuperação destes componentes metálicos contidos em REEE (WANG et al., 2017; ZENG; MATHEWS; LI, 2018).

Além de substâncias valiosas, os equipamentos eletroeletrônicos podem conter diversas substâncias tóxicas, como por exemplo metais pesados (mercúrio, cádmio, chumbo e outros), aditivos retardadores de chama bromados (entre eles, pentabromofenol, éter difenil polibromado, tetrabromobisfenol - A) presentes em plásticos, como o policloreto de vinila (PVC) que é usado em revestimento isolante de fios e cabos além de outros elementos. Devido à presença desses compostos, o resíduo eletroeletrônico é comumente classificado como perigoso, apresentando

riscos à saúde humana e ao meio ambiente caso o seu gerenciamento não ocorra de forma adequada (TSYDENOVA; BENGTTSSON, 2011).

As técnicas existentes para a recuperação de metais valiosos provenientes de recursos secundários após a realização de pré-tratamento mecânico são a pirometalurgia, hidrometalurgia, eletrometalurgia e biometalurgia. A pirometalurgia consiste na queima em altas temperaturas de REEE pré-tratados mecanicamente, sendo o maior problema desta rota tecnológica a formação de gases tóxicos, como por exemplo dioxinas, furanos e fumos metálicos. Na via hidrometalúrgica, a separação dos metais ocorre através do ataque com soluções contendo ácidos ou bases fortes, fazendo com que os metais se solubilizem nesta solução, porém geram-se águas residuais de difícil tratamento, além do risco associado à exposição a ácidos na forma líquida e gasosa. Já a eletrometalurgia representa o refino de metais por eletrólise, onde ocorrem reações de oxirredução não espontâneas, o que representa o consumo de energia elétrica para a viabilidade do processo. A biometalurgia, que consiste na recuperação de metais através de processos envolvendo microrganismos, surge como uma alternativa sustentável em relação às técnicas mais tradicionais (AWASTHI; LI, 2017; GERBASE; OLIVEIRA, 2012; TSYDENOVA; BENGTTSSON, 2011).

As principais técnicas de biometalurgia são a biolixiviação, na qual ocorre a solubilização de metais com o auxílio de reações metabólicas de microrganismos, e a biossorção, que consiste na adsorção de metais na parede celular da biomassa. Além destas, também é possível citar as técnicas de bioprecipitação, biorredução, recuperação bioeletroquímica e bioacumulação (IŞILDAR et al., 2019; XAVIER et al., 2019).

O presente trabalho detalha, mais adiante, as técnicas biometalúrgicas com aplicação na recuperação de metais provenientes de resíduos eletrônicos, além de realizar uma prospecção tecnológica através de uma análise de documentos de patentes que englobam estas tecnologias, com o objetivo de identificar as principais inovações e tendências deste campo tecnológico, além de analisar os principais agentes de inovação e os países ou regiões com interesse no desenvolvimento tecnológico desta área.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos – Definição, Classificação e Principais Componentes

Resíduo de equipamento eletroeletrônico (*e-waste* ou *electronic waste*, em inglês) pode ser considerado como: “um termo usado para cobrir itens de todos os tipos de equipamentos elétricos e eletrônicos (EEE) e suas partes que foram descartadas pelo proprietário como resíduo sem a intenção de reutilização.” (KUEHR, 2014).

Outra definição importante e muito utilizada para REEE foi dada pelo Parlamento Europeu, através de sua Diretiva 2012/19/EU, no Art. 3º, item e), que estabelece:

“Resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos” ou “REEE”, equipamentos elétricos e eletrônicos que constituem resíduos na aceção do artigo 3.º, ponto 1, da Diretiva 2008/98/CE, incluindo todos os componentes, subconjuntos e materiais consumíveis que fazem parte integrante do produto no momento em que este é descartado;(UNIÃO EUROPEIA, 2012).

O documento citado acima foi elaborado pelo Parlamento Europeu com o objetivo de reformular a Diretiva 2002/96/CE (UNIÃO EUROPEIA, 2003), que também definia os REEE e tratava de assuntos relevantes a estes, porém necessitava passar por atualização.

Uma questão pertinente, presente em ambas as definições apresentadas, se refere ao ato do descarte do EEE ou de algum dos seus componentes. O proprietário do EEE deve decidir se este, ou um de seus acessórios, ainda é útil ou não para ele. Caso seja útil de alguma forma, seja para reutilização ou doação, o mesmo não pode ser caracterizado como resíduo (KUEHR, 2014).

A União Europeia, por meio da Diretiva 2012/19/EU (UNIÃO EUROPEIA, 2012) também classificou os EEE em seu anexo IV, cujos dados seguem na Tabela 1:

Tabela 1 - Classificação de EEE de acordo com o Anexo IV da Diretiva do Parlamento Europeu

Categorias REEE	
EEE	Exemplos
Equipamentos de regulação da temperatura	Frigoríficos; congeladores; equipamentos de distribuição automática de produtos frios; equipamentos de ar condicionado; equipamentos desumidificadores; bombas de calor. Radiadores a óleo e outros equipamentos de regulação da temperatura que utilizem para o efeito outros fluidos que não a água.
Ecrãs, monitores e equipamentos com ecrãs de superfície superior a 100 cm ²	Ecrãs; aparelhos de televisão; molduras fotográficas LCD; monitores, computadores portáteis "laptop"; computadores portáteis "notebook".
Lâmpadas	Lâmpadas fluorescentes clássicas; lâmpadas fluorescentes compactas; lâmpadas fluorescentes; lâmpadas de descarga de alta intensidade, incluindo lâmpadas de sódio sob pressão e lâmpadas de haletos metálicos; lâmpadas de sódio de baixa pressão; LED.
Equipamentos de grandes dimensões	Máquinas de lavar roupa; secadores de roupa; máquinas de lavar louça; fogões; fornos elétricos; placas de fogão elétricas; aparelhos de iluminação; equipamento para reproduzir sons ou imagens; equipamento musical (excluindo tubos de órgãos instalados em igrejas); aparelhos utilizados no tricô e tecelagem; macrocomputadores (mainframes); impressoras de grandes dimensões; copiadoras de grandes dimensões; caça-níqueis (slot machines) de grandes dimensões; dispositivos médicos de grandes dimensões; instrumentos de monitorização e controlo de grandes dimensões; aparelhos de grandes dimensões que fornecem automaticamente produtos e dinheiro; painéis fotovoltaicos.
Equipamentos de pequenas dimensões	Aspiradores; aparelhos de limpeza de alcatifas; aparelhos utilizados na costura; aparelhos de iluminação; micro-ondas; equipamentos de ventilação; ferros de

	engomar; torradeiras; facas elétricas; cafeteiras elétricas; relógios; máquinas de barbear elétricas; balanças; aparelhos para cortar o cabelo e outros aparelhos para o cuidado do corpo; calculadoras de bolso; aparelhos de rádio; câmaras de vídeo; gravadores de vídeo; equipamentos de alta-fidelidade; instrumentos musicais; equipamento para reproduzir sons ou imagens; brinquedos elétricos e eletrônicos; equipamentos de desporto; computadores para ciclismo, mergulho, corrida, remo, etc.; detetores de fumo; reguladores de aquecimento; termóstatos; ferramentas elétricas e eletrônicas de pequenas dimensões; dispositivos médicos de pequenas dimensões; instrumentos de monitorização e controle de pequenas dimensões; aparelhos de pequenas dimensões que fornecem produtos automaticamente; equipamentos de pequenas dimensões com painéis fotovoltaicos integrados.
Equipamentos informáticos e de telecomunicações de pequenas dimensões (com nenhuma dimensão externa superior a 50 cm)	Telemóveis, GPS, calculadoras de bolso, routers, computadores pessoais, impressoras, telefones.

Fonte: Tabela criada pelo autor com informações retiradas de (UNIÃO EUROPEIA, 2012)

No Brasil, a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial classifica os EEE de outra forma, divide os mesmos em Linha Branca (refrigeradores e congeladores, fogões, lavadoras de roupa e louça, secadoras, condicionadores de ar), Linha Marrom (monitores e televisores de tubo, plasma, de diodo emissor de luz (LED) e de cristais líquidos (LCD), aparelhos de DVD e VHS, equipamentos de áudio, filmadoras), Linha Azul (batedeiras, liquidificadores, ferros elétricos, furadeiras, secadores de cabelo, espremedores de frutas, aspiradores de pó, cafeteiras) e Linha Verde (computadores desktop e laptops, acessórios de informática, tablets e telefones celulares), (ABDI, 2013). Lembrando que ao final da vida útil dos EEE, os mesmos viram resíduos.

Um dos principais componentes de equipamentos eletroeletrônicos são as placas de circuito impresso, já que estão presentes em praticamente todos os

equipamentos desta indústria. Na torre de um computador por exemplo, existe um conjunto de placas de circuito impresso (placa mãe, placa de rede, placa de modem e placa de vídeo). Estas placas contêm uma gama de componentes valiosos, que é o caso de metais como cobre, ouro, prata, paládio, entre outros. Entretanto as placas também possuem elementos tóxicos (berílio, antimônio, cádmio e retardantes de chamas bromados). Estas placas são os principais componentes na recuperação de metais preciosos em REEE, já que de 28 a 30% dessas placas são constituídas por elementos metálicos. Também fazem parte da constituição das placas de circuito impresso: plástico, cerâmica, fibra de vidro e resinas acrílicas e fenólicas (ABDELBASIR et al., 2018; GERBASE; OLIVEIRA, 2012; TSYDENOVA; BENGTTSSON, 2011).

Os monitores de computadores e televisores, antigamente, eram feitos de tubos de raios catódicos (CRT, siga em inglês), porém estas telas possuem grandes quantidades de substâncias tóxicas (contém compostos de chumbo, cádmio, estrôncio, bário, arsênio, antimônio e fósforo), sendo posteriormente substituídas por painéis de LED e de LCD. Os monitores CRT possuem elementos de terras raras, cuja recuperação é desejada, porém sua reciclagem é dificultada pela alta presença de contaminantes, em especial fósforo e chumbo. Nos painéis LCD, cristais líquidos são agregados entre finas camadas de vidro e elementos de controle elétrico. Mais de 70% do consumo total do elemento índio pode ser atribuído à produção de monitores do tipo LCD, além de metais preciosos como ouro, prata e paládio, o que garante interesse em sua reciclagem, pois com sua vida útil de 3 a 5 anos, este tipo de monitor está se tornando resíduo eletrônico rapidamente (GERBASE; OLIVEIRA, 2012; TSYDENOVA; BENGTTSSON, 2011; WANG et al., 2017).

As baterias recarregáveis são bastante utilizadas em aparelhos como celulares, *notebooks*, antigas câmeras de vídeo e outros equipamentos eletrônicos portáteis. Existem diferentes tipos de baterias, entre eles é possível citar baterias do tipo níquel – cádmio, níquel hidreto metálico, chumbo-ácida e baterias de íons de lítio. A presença de metais como cádmio, chumbo e lítio nessas baterias gera uma preocupação do ponto de vista ambiental. A crescente demanda por equipamentos eletroeletrônicos e veículos elétricos está aumentando o consumo de baterias de forma considerável, em especial as baterias de íons de lítio, devido às suas

propriedades diversas, como elevada tensão, grande capacidade de armazenamento e longa vida útil. O lítio (metal raro), possui concentração de 5 a 7% nesses dispositivos, o que corresponde a uma concentração muito maior do que a encontrada em depósitos naturais de minério. As aplicações do lítio crescem a uma taxa anual de 7%, com isso, uma estratégia para recuperação desse metal escasso, se faz através da reciclagem destas baterias (TSYDENOVA; BENGTTSSON, 2011; WANG et al., 2017; ZENG; LI; LIU, 2015).

2.2. Materiais Críticos e de Valor Agregado

Diversos materiais de valor agregado são encontrados em REEE, como ouro, prata, platina, cobre e outros metais valiosos e que podem vir a ser estratégicos para as nações. É possível encontrar em alguns REEE, até 60 elementos da tabela periódica, sendo muitos deles possíveis de serem recuperados. A Universidade das Nações Unidas estima que o valor total de matérias-primas presentes em REEE em 2016, foi em torno de 55 bilhões de euros. Ressalta-se que o valor referente à matéria prima (2 Euros – valor de metais e plásticos presentes na massa média de 90g de um telefone celular) é relativamente pequeno, comparado ao valor de um smartphone novo (200 Euros - preço médio de venda de um smartphone novo em todo o mundo em 2016) ou usado (118 Euros - preço médio de venda de um smartphone usado em 2016), (BALDE et al., 2017). Isso mostra como o valor obtido através dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos pode superar bastante os 55 bilhões de euros estimados pela Universidade das Nações Unidas, se a vida útil dos equipamentos for prolongada.

Estão presentes também nos EEE, os elementos de terras raras, que são formados por um grupo de 17 elementos (os 15 lantanídeos, escândio e ítrio), e possuem propriedades químicas semelhantes. Estes metais apresentam uma grande importância na economia devido ao número crescente em suas aplicações, que envolvem equipamentos de alta tecnologia e que são fundamentais na transição para uma economia verde e de baixo carbono, como por exemplo carros híbridos e elétricos, turbinas eólicas e outros (BINNEMANS et al., 2013).

A Figura 1 ilustra algumas fontes de metais raros e preciosos (RPMs, sigla em inglês) oriundos de minas urbanas:

Tabela 2 - Exemplos de metais críticos para a União Europeia contidos em componentes de REEE

Componentes de REEE	Metais	Concentração (ppm)	Número de metais críticos e valiosos
Placas Principais	Au, Pd, Ge, Ga	1 - 100	4
Placas de circuito impresso	Fe, Al, Ag, Ni, Zn Cu	100 - 10,000 > 10,000	
Baterias			
Baterias de íons - Li	Co, Li	1 - 100	2
Baterias NiMH	Co, La, Ni	100 - 10,000	2
Drives de Memória			
Ímas HDD	Nd, Pr, Dy	> 10,000	3
Unidade de estado sólido (SDD)	Cu, Ag, Au, Pd	1 - 100	4
Monitores			
Monitores de cristal líquido (LCD)	Y, In, Sr	1 - 100	2
Diodos de emissão de luz (LED)	Au, Ag, In, Sn	1 - 100	3

Fonte: Adaptado de (IŞILDAR et al., 2019)

Há uma concentração de elementos de terras raras nos seguintes países: China, Brasil, Canadá, EUA, Rússia e Congo. Sendo a China detentora de cerca de 90% da oferta mundial destes elementos. Os materiais podem ser classificados como estratégicos ou críticos de acordo com uma comparação entre sua disponibilidade e sua escassez. No caso do Brasil, por exemplo, o Nióbio é um material estratégico, tendo em vista que o país é o maior exportador deste minério, porém o Nióbio é um metal crítico para outras nações que não o possuem (XAVIER et al., 2019).

Existe uma grande demanda por estes materiais em países desenvolvidos, tendo em vista que estes são essenciais para a produção de equipamentos de alta tecnologia. Os países Europeus, que são pobres nestes recursos minerais críticos e não são auto suficientes para atender à sua demanda doméstica, estão trabalhando para aumentar sua recuperação através da reciclagem de resíduos eletrônicos, em especial de telefones celulares e computadores (MASSARI; RUBERTI, 2013).

2.3. Mineração Urbana e Economia Circular

A extração de recursos do subsolo a partir da lavra de uma jazida mineral e o processamento dos minérios representa a mineração tradicional (XAVIER, 2018). Tendo em vista que a definição de antroposfera consiste na fração do ambiente que foi elaborada ou modificada pela ação do homem, a ideia de mineração urbana considera os espaços urbanos como a fonte de materiais, gerados pela ação do homem, que podem ser utilizados, reutilizados e reciclados ciclicamente. O conceito de mineração urbana pode ser empregado em referência à vários tipos de resíduos, porém o termo é cada vez mais relevante para tratar de resíduos eletrônicos, tendo em vista a grande quantidade de minerais presentes nesta categoria de resíduo. A mineração urbana engloba ações para o gerenciamento sistemático de resíduos e estoques de recursos antropogênicos, a fim de obter benefícios econômicos e conservar o meio ambiente, apesar das quantidades de recursos conservados ainda ser considerada pequena (ONGONDO; WILLIAMS; WHITLOCK, 2015).

O desenvolvimento do conceito da mineração urbana surgiu pelo reconhecimento da necessidade de modificar a mineração convencional ao extrair matérias-primas, tendo em vista que é preciso gerar valor através de materiais descartados, no momento em que a sociedade se move em direção à uma economia circular. Certos estudos mostram que algumas nações adotaram metas de reciclagem obrigatórias, oferecendo incentivos para o mercado ajudar no cumprimento das mesmas. A mineração urbana representa uma importante estratégia para alguns países, no que se refere à escassez de matérias primas. A Comissão Europeia reconhece os resíduos como o mais importante recurso para diminuir sua dependência de matérias-primas importadas. Além disso, os insumos de energia e recursos para a recuperação de metais como ouro, prata, cobre, ferro e alumínio, entre outros, podem consumir cerca de 60% de insumos de energia e recursos da exploração de minérios brutos no caso do Japão (HU; POUSTIE, 2018).

Também é possível observar que a mineração urbana, através do aproveitamento de recursos dos resíduos eletroeletrônicos, está começando a se tornar mais vantajosa economicamente do que a mineração convencional em alguns lugares (ZENG; MATHEWS; LI, 2018), tendo em vista que uma mina urbana terá mais valor quanto mais próspera for a população que reside em uma determinada cidade

ou região, pois o valor da mina urbana depende do descarte de eletrônicos, o que está associado ao padrão de consumo desta sociedade (XAVIER, 2018).

Com isso, também é importante citar o conceito de economia circular que consiste em “uma economia industrial que é restauradora ou regenerativa por intenção ou design” de acordo com a Fundação Ellen MacArthur (GEISSDOERFER et al., 2017). Na transição do atual modelo econômico linear para o modelo circular, a ideia principal é o aumento do tempo de vida útil dos produtos, além de incentivar técnicas de reparo, reforma e reutilização, promovendo o uso de matéria-prima secundária e criando novas oportunidades de emprego. Além disso, novos modelos de negócio circulares surgem com a transformação de produtos em serviços. A mineração urbana pode ser considerada como um aspecto pertencente à economia circular, podendo contribuir com a redução de impactos ambientais na cadeia de gestão de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos e na recuperação de metais preciosos (XAVIER et al., 2019).

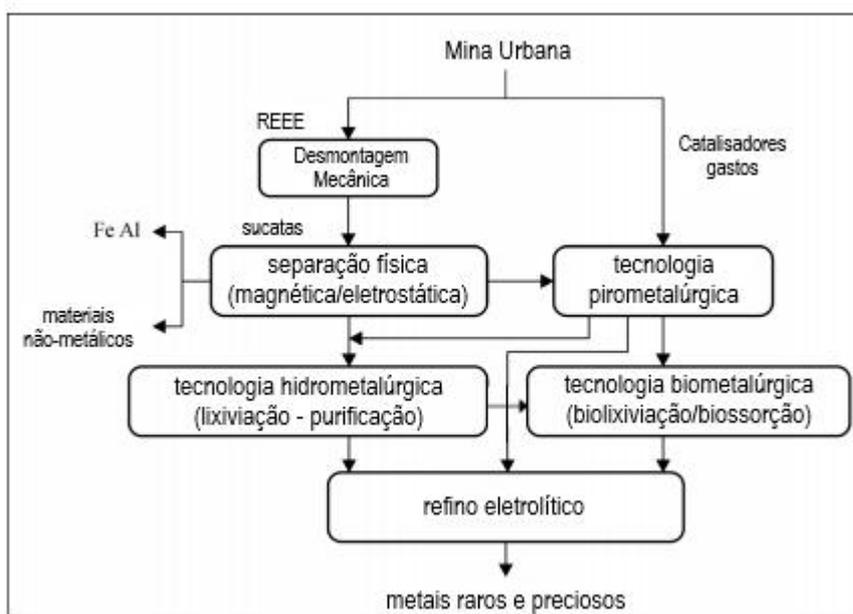
Neste contexto, os metais valiosos e materiais críticos terminam em grandes centros urbanos, onde geralmente não existe a mineração convencional, estocados em REEE e esperando para serem extraídos. As usinas de reciclagem de mineração urbana tem como sua principal função a recuperação de valor dos resíduos, através de tecnologias de reciclagem de metais valiosos e outros materiais (OKWU; ONYEJE, 2014).

2.4. Tecnologias de Reciclagem de metais presentes em REEE

Existem três etapas principais na reciclagem de REEE que são: coleta, pré-processamento e processamento final. Sendo a etapa de coleta facilitada, frequentemente, através de políticas públicas apropriadas, educação ambiental eficaz, no sentido de conscientizar a sociedade em relação ao descarte correto de resíduos e a instalação de pontos de coleta seletiva em locais públicos. Os equipamentos eletrônicos são classificados e seguem para a etapa de pré-processamento (processamento mecânico). Já os resíduos que puderem ser reutilizados, retornam para a cadeia de suprimentos. A etapa de pré-processamento é fundamental na reciclagem de REEE e principalmente para a recuperação de metais. Os equipamentos são geralmente desmontados manualmente e seus componentes individuais são isolados. Após isso, ocorre o processamento mecânico,

onde os materiais metálicos e não metálicos são separados através da trituração de seus componentes com posterior utilização de variadas técnicas de separação de acordo com as características físicas dos materiais, como densidade, suscetibilidade magnética e condutividade elétrica. Por fim, a fração metálica segue para o seu processamento final, com técnicas metalúrgicas de refino: processos hidrometalúrgicos, pirometalúrgicos, eletrometalúrgicos, biometalúrgicos e possíveis combinações entre algumas técnicas (ABDUL KHALIQ et al., 2014; WANG et al., 2017). A Figura 2 mostra o fluxograma de processo tradicional de recuperação de metais raros e preciosos, considerando possibilidade de recuperação híbrida.

Figura 2 - Fluxograma do processo tradicional de recuperação de metais raros e preciosos de resíduos eletrônicos e catalisadores usados



Fonte: Adaptado de (WANG et al., 2017)

O processamento pirometalúrgico pode produzir metais puros, ligas ou compostos intermediários e ocorre em altas temperaturas (1250 °C no exemplo do processo Noranda). Esta técnica demanda uma grande quantidade de energia para a manutenção da temperatura necessária em cada etapa do processo. A energia geralmente é cedida pela queima de combustíveis fósseis, aquecimento elétrico ou por reações exotérmicas que ocorrem em diferentes estágios desta rota. Existem diversas etapas no processo pirometalúrgico, incluindo secagem da matéria-prima até o refino do produto final. A técnica de transformação química que será adotada

depende do material de partida, sendo as opções mais conhecidas: a calcinação (decomposição em elevada temperatura na presença de oxigênio), ustulação (calcinação de sulfetos) e pirólise (derretimento do material em altas temperaturas em ambiente com pouco ou sem oxigênio). As principais desvantagens da adoção do processo pirometalúrgico são: a possibilidade da liberação de gases tóxicos, perda de material durante a queima, elevado consumo de energia e possibilidade de perda de metais preciosos na formação de escória (CUI; ZHANG, 2008; GERBASE; OLIVEIRA, 2012).

A rota hidrometalúrgica para a extração de metais contidos em REEE é bastante semelhante à técnica hidrometalúrgica tradicional, utilizada para a extração de metais de minérios primários, com apenas algumas modificações para o caso de matérias-primas secundárias. A etapa principal consiste na lixiviação ácida ou básica, dos metais presentes no REEE triturado vindos da etapa mecânica (pré-tratamento), dissolvendo seletivamente os metais de interesse. A solução rica em metais, em seguida, deve ser enriquecida aumentando a sua concentração. A seletividade do método permite que os metais de interesse sejam separados de impurezas indesejadas para a sequência do processamento. Os metais podem ser isolados através de técnicas de extração por solvente, adsorção e troca iônica. Conseqüentemente, os metais são recuperados através de redução química ou por técnicas de eletrometalurgia. Entre as desvantagens do processo hidrometalúrgico, podem-se citar: o tempo prolongado de processamento, a geração de águas residuais, a ação química agressiva de solventes utilizados na etapa de lixiviação podendo acarretar na corrosão de equipamentos, a perda de metais preciosos que não forem dissolvidos na lixiviação e outros (ABDUL KHALIQ et al., 2014; TESFAYE et al., 2017; WANG et al., 2017).

O processamento eletrometalúrgico consiste no refino de metais através de eletrólise, no qual através de reações não espontâneas de oxirredução, o metal presente no material se dissolve na forma de íons metálicos e em seguida se deposita no catodo em sua forma pura. O eletrorrefino e a eletro-obtenção são dois processos eletrometalúrgicos que podem ser utilizados. O eletrorrefino geralmente é escolhido no caso de obtenção de metais fundidos na sequência de processos pirometalúrgicos, no qual o anodo é constituído pelo próprio metal fundido contendo impurezas. Durante

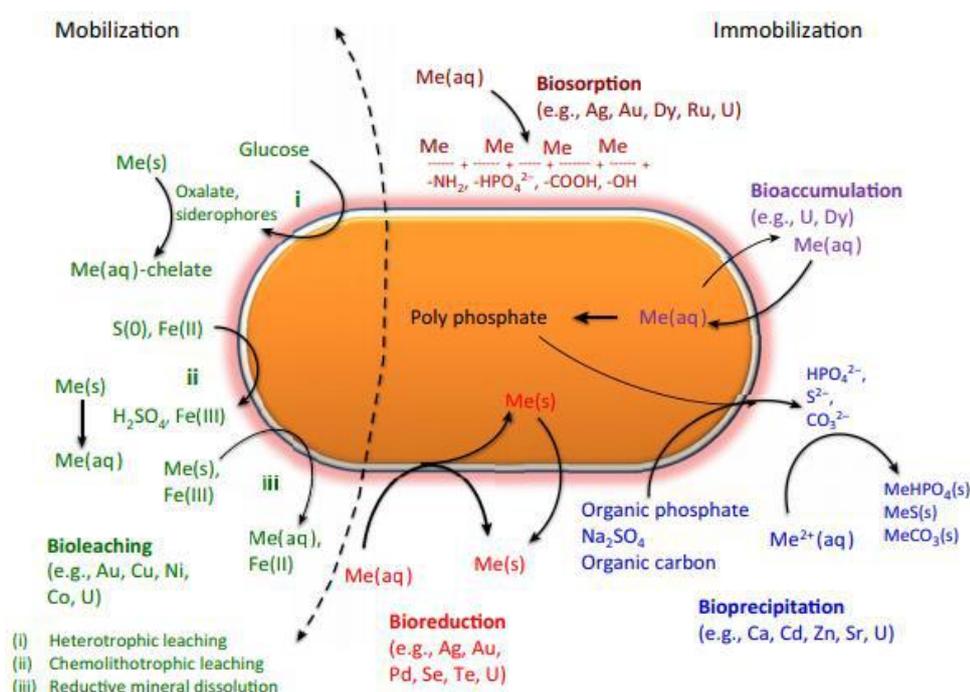
a eletrólise, o metal é depositado no catodo (sem as impurezas que estavam contidas no anodo anteriormente) e os metais remanescentes no anodo podem se dissolver no eletrólito ou formar um lodo que se concentra ao fundo da célula onde ocorre o processo de eletrólise. Já a eletro-obtenção é a eletrólise de uma solução de sal de metais, que pode ser obtida por extração por solvente ou lixiviação de minério concentrado. Esta técnica é mais utilizada na sequência de processos hidrometalúrgicos. Ocorre a deposição do metal no catodo através de aplicação de corrente elétrica na solução contendo íons metálicos (GERBASE; OLIVEIRA, 2012).

Ainda dentre as rotas de processamento para a reciclagem de metais presentes em REEE, se pode citar o processamento biometalúrgico ou biohidrometalúrgico, que é baseado na recuperação de metais através de métodos biotecnológicos, que consiste nas interações dos microrganismos com os minerais. A biohidrometalurgia é uma rota definida para processar minérios primários, podendo ser uma alternativa interessante dentro do contexto da mineração urbana de materiais críticos. Uma grande vantagem dos processos biotecnológicos, comparando-os com técnicas convencionais de recuperação química, consiste na sua seletividade em relação à metais críticos e valiosos. Existem também vantagens no sentido de menor impacto ambiental e melhor relação custo-benefício. Como desvantagens dos processos biometalúrgicos, é possível citar o tempo elevado de processamento, a necessidade do metal estar exposto à ação microbiana, além do desafio no aumento de escala do processo, tendo em vista que algumas substâncias presentes nos resíduos eletrônicos podem inibir a atividade microbiana ou serem tóxicas aos microrganismos e ainda o desconhecimento de alguns mecanismos biometalúrgicos (GERBASE; OLIVEIRA, 2012; IŞILDAR et al., 2019).

2.4.1. Tecnologias Biometalúrgicas para a Recuperação de Metais

Os principais métodos para a recuperação de metais pela rota biometalúrgica são a biolixiviação e a bioissorção. Também existem outras técnicas, como bioprecipitação, biorredução, recuperação bioeletroquímica e a bioacumulação. Os métodos de recuperação biometalúrgica serão detalhados a seguir. A Figura 3 mostra uma representação geral dos mecanismos de recuperação de metais de alguns processos biometalúrgicos.

Figura 3 – Interações entre o micróbio e o metal em diversos mecanismos de solubilização e imobilização de metais na recuperação biológica



Fonte: (NANCHARAIH; MOHAN; LENS, 2016)

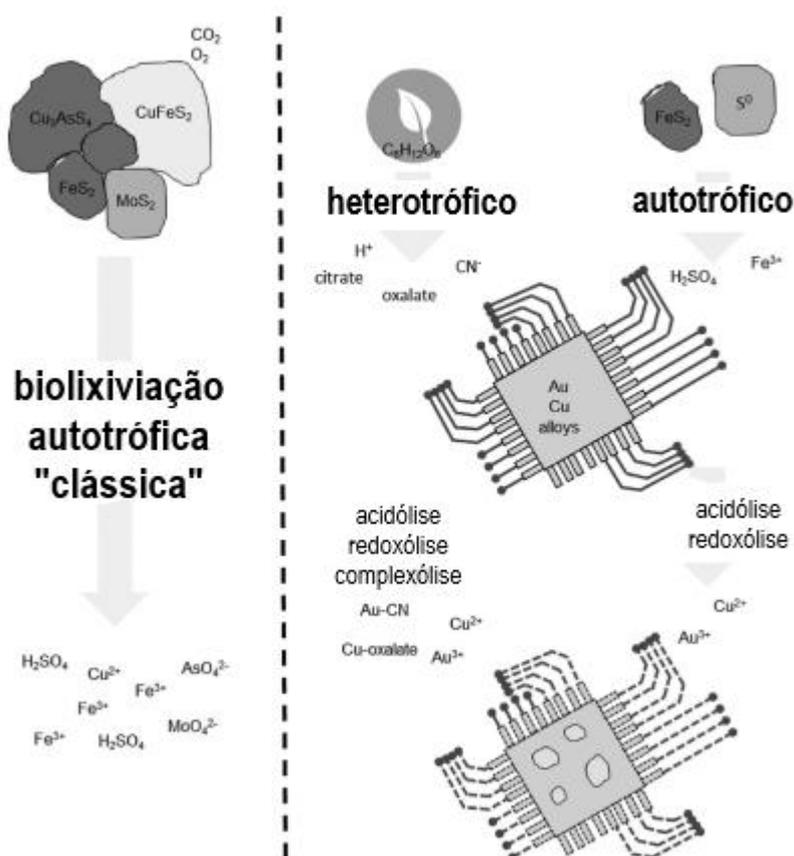
2.4.1.1. Tecnologia de Biolixiviação

A biolixiviação consiste na interação de microrganismos específicos como fungos, bactérias, algas ou seus metabólitos, com metais através de reações de oxirredução. Esta técnica tem sido bastante aplicada para recuperar metais raros e preciosos presentes em resíduos eletrônicos e seus componentes. Porém, comparada à lixiviação hidrometalúrgica, sua eficiência é pequena, além de a maioria de suas aplicações ainda estar em escala laboratorial. Neste processo, algumas bactérias são capazes de suportar condições extremas de pH, o que favorece a extração de metais contidos nos REEE através, por exemplo, de sua oxidação por íons de ferro, onde microrganismos oxidam íons ferrosos (Fe^{2+}) em íons férricos (Fe^{3+}), ou ainda pela ação de microrganismos cianogênicos (WANG et al., 2017; XAVIER et al., 2019).

A biolixiviação pode ocorrer principalmente através do metabolismo de microrganismos procariotos quimiolitotróficos, bactérias heterotróficas e fungos. Na recuperação de metais provenientes de recursos secundários como REEE, é possível verificar a biolixiviação por microrganismos tanto autotróficos (que produzem sua própria energia), quanto heterotróficos (que precisam obter energia por fonte de

carbono). É importante ressaltar que os mecanismos de biolixiviação de metais provenientes de resíduos eletroeletrônicos são diferentes em comparação ao mecanismo aplicado no processamento de minérios primários, na forma de sulfetos, devido a diversidade química na forma como o metal se encontra (IŞILDAR et al., 2019). A Figura 4 apresenta um esquema da biolixiviação de metais provenientes de recursos primários e secundários:

Figura 4 – Representação da biolixiviação de minérios primários e de recursos secundários (REEE)

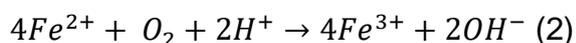
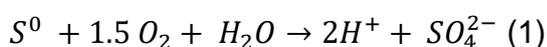


Fonte: Adaptado de (IŞILDAR et al., 2019)

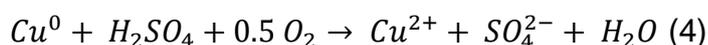
Os organismos quimiolitotróficos, que produzem sua energia através da oxidação de compostos inorgânicos, são autotróficos e possuem grande resistência à toxicidade de metais pesados. Com isso, estes organismos podem ser amplamente utilizados em processos que envolvem outros tipos de metais (como REEE), sendo necessária a adição de minerais como Fe^{2+} e S^0 , tendo em vista que no caso do tratamento de resíduos, estes minérios não estão disponíveis como em fontes primárias. Os organismos *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans*

e *Leptospirillum ferrooxidans* são alguns exemplos bastante utilizados em processos de biolixiviação. No caso de organismos heterotróficos, bactérias, arqueias e fungos podem ser utilizados na biolixiviação de metais. Estes organismos toleram uma faixa de pH ampla, permitindo o tratamento de resíduos em condições moderadamente alcalinas. No caso da biolixiviação de metais críticos de REEE por organismos heterotróficos, tem o seu foco na utilização de microrganismos que produzem cianeto (que solubiliza o ouro através de reações de complexólise) ou ácidos orgânicos, sendo que no caso de microrganismos cianogênicos, o foco são metais preciosos e metais do grupo da platina, que geralmente não são lixiviáveis por ácidos minerais. Na biossíntese do cianeto, este é excretado na fase de limitação de crescimento microbiano. Outros metais críticos como Co, Ga e Li, são lixiviados através da quelação (formação de complexos com metal como átomo central), tendo em vista que bactérias e fungos heterotróficos podem biolixiviar estes metais através da biossíntese de ácidos orgânicos (IŞILDAR et al., 2019).

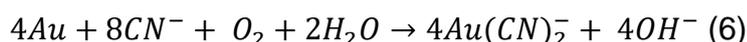
No mecanismo de biolixiviação de cobre por *A. ferrooxidans* por exemplo, ocorre a oxidação do enxofre elementar (S^0) em ácido sulfúrico (H_2SO_4), com o íon ferroso (Fe^{2+}), que atua como doador de elétrons, também sendo oxidado à íon férrico (Fe^{3+}) pelo microrganismo. Tanto o enxofre elementar quanto o íon férrico precisam ser adicionados ao meio. As reações 1 e 2 são provocadas pela atividade do organismo.



Em paralelo, ocorrem as reações químicas de lixiviação, onde o íon Fe^{3+} atua como agente de oxidação, reagindo com o metal de interesse (neste caso, o cobre), formando Fe^{2+} , que será novamente oxidado pelo microrganismo. O cobre metálico também é oxidado ao reagir com oxigênio e ácido sulfúrico, resultando em um mecanismo de biolixiviação por acidólise-redoxólise (IŞILDAR et al., 2019). As reações 3 e 4 mostram estas etapas.



No caso da biolixiviação de ouro por microrganismos heterotróficos, ocorre a produção de cianeto (CN^-) em meio aquoso através da descarboxilação oxidativa da glicina, com posterior formação de complexos de cianeto com os íons metálicos. Algumas bactérias cianogênicas são *Chromobacterium violaceum*, *Pseudomonas fluorescens* e *Bacillus megaterium*, além de cepas de *Clitocybe*, *Marasmius*, *Pholiota*, *Polyporus* e *Tricholoma* (ILYAS; LEE, 2014). As reações 5 e 6 mostram a biolixiviação do ouro através de biocianeto.



Metais básicos como cobre, níquel e zinco formam complexos estáveis com o cianeto e sua presença pode interferir na biolixiviação do ouro, tendo em vista que são solubilizados preferencialmente. Uma possível solução seria a biolixiviação destes metais básicos em uma etapa primária, com posterior lixiviação do ouro através de cianeto produzido por microrganismos (IŞILDAR et al., 2016).

2.4.1.2. Tecnologia de Biossorção

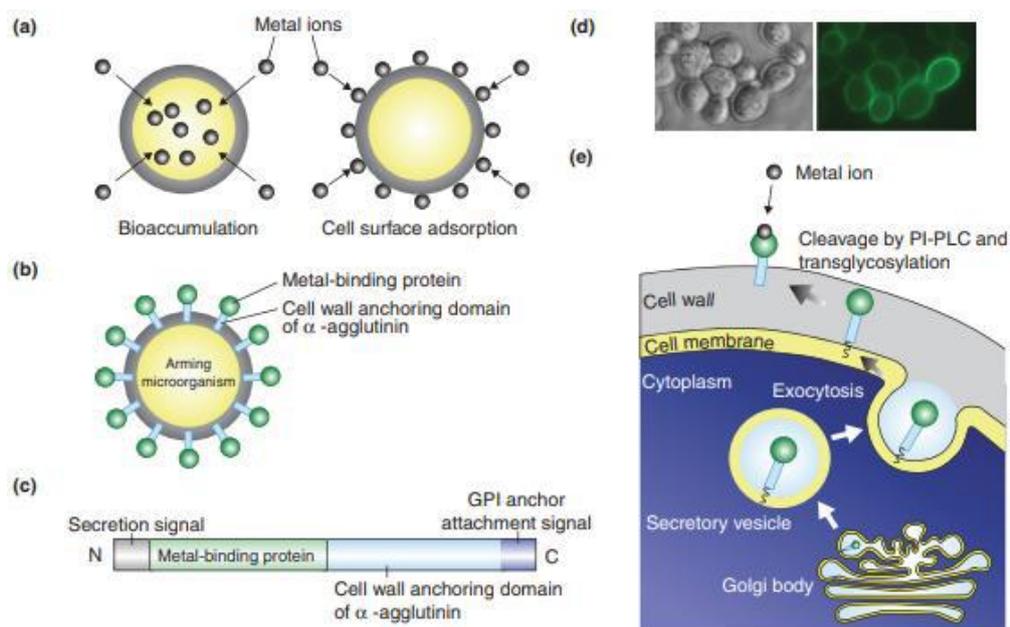
A tecnologia de adsorção biológica ocorre através da habilidade de microrganismos biossorbentes, como algas, bactérias, fungos e leveduras, ou biomassa de origem vegetal, se ligarem aos íons metálicos, presentes no ambiente extracelular. Essa interação pode se dar por meio de ligação de metais em solução na superfície celular (biossorção), ou pelo transporte dos íons para dentro da célula, para diversas funções intracelulares que dependem das propriedades específicas da biomassa (bioacumulação). A biossorção é geralmente utilizada como etapa subsequente à lixiviação, sendo uma opção com baixo custo de recuperação de metais em fase aquosa. O processo apresenta vantagens como baixo custo operacional, minimização do volume do lodo químico ou biológico que será tratado e uma alta eficiência na desintoxicação de efluentes (WANG et al., 2017; XAVIER et al., 2019).

A biossorção é uma subcategoria da adsorção, na qual a superfície adsorvente é uma matriz biológica (biossorvente), sendo esse um processo físico-químico e independente do metabolismo do microrganismo, isto é, não se faz necessário que as células estejam vivas para que ocorra a adsorção dos íons

metálicos na superfície celular. Na bioissorção, ocorre um processo de ligação rápida e reversível dos íons, que estão em solução aquosa, aos grupos funcionais presentes na superfície da biomassa. Este método pode ocorrer em uma grande faixa de valores de temperatura (4 - 90 °C) e pH (3 - 9). Além disso, a bioissorção é um processo que permite a recuperação seletiva de metais, sendo esta uma das principais vantagens desta técnica (IŞILDAR et al., 2019; MICHALAK; CHOJNACKA; WITEK-KROWIAK, 2013).

A Figura 5 mostra diversos aspectos possíveis na bioissorção, como a diferença entre a bioissorção e bioacumulação (a), estrutura de proteínas de ligação presentes na superfície celular (b), estrutura de proteína de fusão para suporte da proteína de ligação de metais na superfície celular (c), micrografia de células com marcação por imunofluorescência de proteína de ligação com metais (d) e mecanismo de produção e transporte de proteínas de ligação com metais até a superfície celular (e):

Figura 5 - Representação da bioissorção e seus diversos aspectos

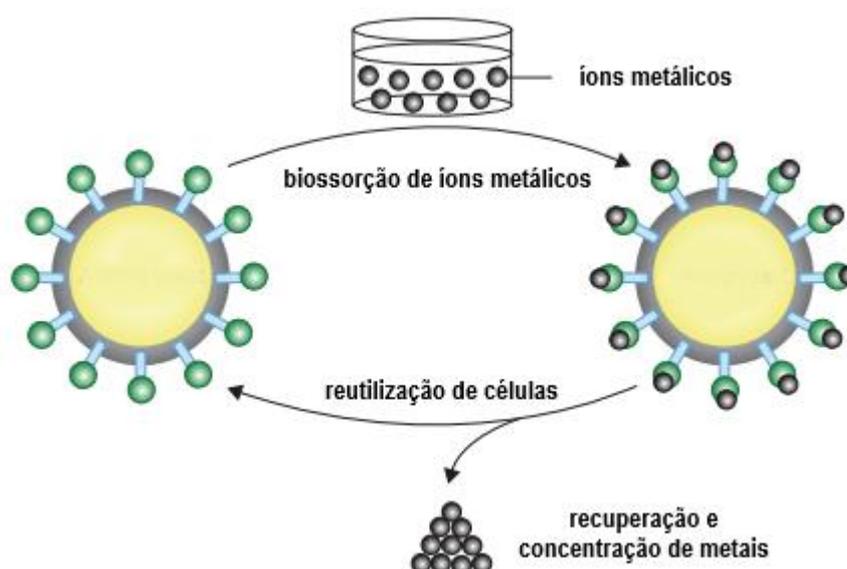


Fonte: (KURODA; UEDA, 2011)

A ligação do metal à superfície da célula pode acontecer por polissacarídeos, proteínas associadas ou grupos funcionais. No caso da bioissorção, não é necessário o rompimento celular na etapa de recuperação dos metais, como

acontece no processo de bioacumulação, que será descrito mais adiante, tornando mais simples a recuperação dos metais bioadsorvidos. Isso permite a reutilização de células em novos ciclos de bioadsorção como mostrado na Figura 6. Técnicas de engenharia genética podem ser empregadas para aumentar o número de grupos funcionais presentes na superfície celular através do aumento na produção de proteínas de ligação de metais, fazendo com que a eficiência de bioadsorção seja maior (KURODA; UEDA, 2011).

Figura 6 - Bioadsorção e dessorção de metais por microrganismo



Fonte: Adaptado de (KURODA; UEDA, 2011)

A capacidade de bioadsorção de metais também está diretamente relacionada com a área superficial da biomassa utilizada e com a presença dos diversos grupos funcionais que promovem a bioadsorção. Entre eles estão os grupos carboxila, imidazol, sulfidríla, amino, fosfato, sulfato, tioéter, fenol, carbonila, amida e hidroxila. É possível aumentar a capacidade de sorção através da funcionalização de biomateriais não vivos, com estruturas quelantes ou outros grupos químicos, porém este tipo de pré-tratamento pode aumentar consideravelmente o custo da técnica. O método de bioadsorção ainda é aplicado de forma limitada na indústria, devido ao desconhecimento de mecanismos, cinética e termodinâmica do processo, mesmo tendo despertado interesse em sua pesquisa desde os anos 90 (IŞILDAR et al., 2019).

2.4.1.3. Outras Técnicas Biometalúrgicas

Existem ainda outras técnicas biometalúrgicas de reciclagem de metais contidos em REEE, como a bioprecipitação, biorredução, recuperação bioeletroquímica e bioacumulação.

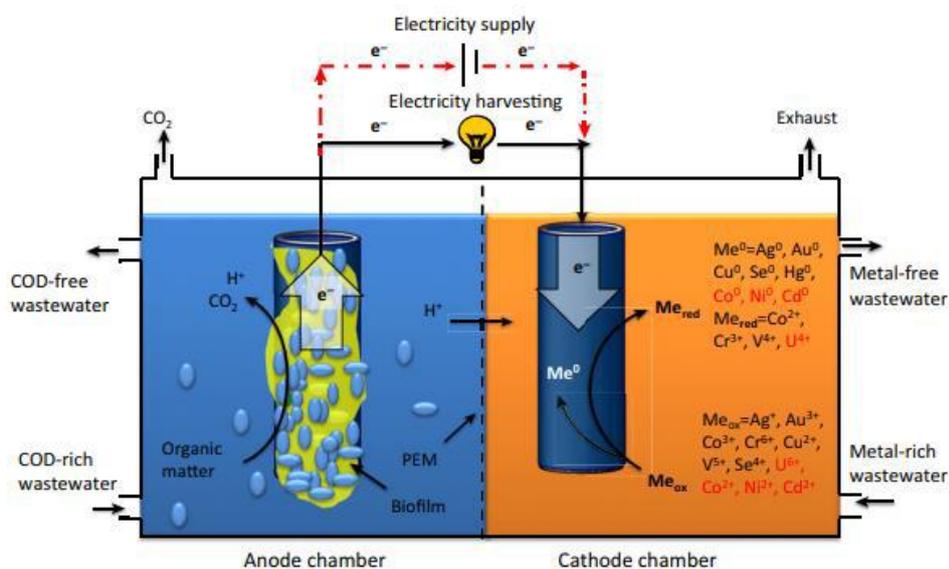
A recuperação de metais presentes em REEE através do método de bioprecipitação, apresenta maior foco na utilização de bactérias redutoras de sulfato, gerando assim o íon S^{-2} , que ao reagir com o metal ionizado presente em solução aquosa, forma o precipitado na forma Me_xS . Este processo tem sido aplicado principalmente nas indústrias de mineração e reciclagem de metais. Os microrganismos metabolizantes podem liberar compostos alternativos, que também podem gerar a precipitação de metais, como por exemplo fosfatos, ou até modificar o ambiente aquoso, como alteração de pH que também favorece a precipitação de determinados metais. Um exemplo de aplicação da técnica de bioprecipitação para recuperar metais provenientes de placas de circuito impresso, em processo contínuo, com a precipitação de Cu através de bactérias redutoras de sulfato, resultou em 90% de eficiência na recuperação (IŞILDAR et al., 2019).

Outro método que envolve a precipitação de metais é a biorredução, que consiste na redução de íons metálicos em solução, podendo ocorrer através de mecanismos intracelulares ou extracelulares, como contato dos íons com grupos funcionais orgânicos (peptídeos contendo amina, no caso da biorredução de paládio em meio ácido) localizados no periplasma ou na superfície celular dos microrganismos. Muitas vezes a biorredução pode ocorrer paralelamente à bioadsorção de metais. O processo é capaz de gerar partículas nanométricas de metais preciosos como prata, paládio e ouro. Na biorredução de ouro por exemplo, podem ser obtidas formas bem definidas de nanoesféricas, nanoprismas triangulares ou de hastes nanométricas, sendo de interesse potencial devido à sua estabilidade em condições atmosféricas, resistência à oxidação e biocompatibilidade, além da possibilidade de aplicação em diversas áreas, como medicina, catálise, eletrônica e óptica (DEPLANCHE; MACASKIE, 2008; ROTARU et al., 2012).

A recuperação bioeletroquímica ou sistemas bioeletroquímicos (BES, sigla em inglês) se aproveita da capacidade dos microrganismos de respirar em eletrodos,

por meio de seu metabolismo anaeróbico, para coletar elétrons de fluxos de resíduos de matéria orgânica. Com esse processo, é possível gerar eletricidade, produtos químicos de valor agregado no tratamento de águas residuais e agir na remediação de contaminantes. Esta coleta de elétrons pode ser utilizada para recuperar, no catodo, os metais em solução, podendo haver ainda uma geração de energia no processo, caso o potencial gerado no bioanodo seja menor do que o potencial de meia célula redox do catodo, caso contrário seria necessário o fornecimento de tensão. Este processo ainda é emergente na recuperação de metais provenientes de REEE, o que significa uma oportunidade de crescimento no futuro (IŞILDAR et al., 2019; NANCHARAI AH; MOHAN; LENS, 2016). A Figura 7 mostra o esquema visual do processo de recuperação bioeletroquímica:

Figura 7 - Esquema de Sistema Bioeletroquímico de câmara dupla usado para recuperar metais



Fonte: (NANCHARAI AH; MOHAN; LENS, 2016)

Além da biossorção, outro processo pode promover a adsorção biológica na recuperação de íons metálicos em solução. A bioacumulação é a captação ativa de íons metálicos por microrganismos vivos, onde os íons metálicos passam pela membrana plasmática sendo transportados para o citoplasma. No processo, ocorre o reconhecimento do metal e posterior ligação por grupos funcionais como proteínas quelantes (metalotioneínas, fitoquelatinas ou glutatona). Além disso, é necessária a utilização de microrganismos tolerantes aos metais, tendo em vista que o método

depende da atividade metabólica para acontecer. Os microrganismos também são capazes de realizar a homeostase do metal, onde a concentração de íons metálicos tende a se igualar dentro e fora da célula. O processo é caracterizado pelo acúmulo intracelular de metal, podendo ainda envolver metilação, precipitação intracelular e outros mecanismos. Em comparação com a biossorção, a técnica de bioacumulação é mais lenta e necessita da manutenção de condições que permitam a sobrevivência dos microrganismos, como por exemplo o fornecimento de nutrientes, além de separação mais difícil após a captura do metal (KADUKOVÁ; VIRČÍKOVÁ, 2005; KURODA; UEDA, 2011).

3. Metodologia

Com o objetivo de identificar as principais tendências e analisar a evolução e o desenvolvimento da aplicação das diferentes tecnologias biometalúrgicas para a recuperação de metais críticos e valiosos presentes em resíduos de equipamentos eletroeletrônicos, foi realizado um estudo de prospecção tecnológica sobre os métodos de biometalurgia descritos na revisão bibliográfica. Neste estudo prospectivo, foi desenvolvida uma análise de documentos de patentes, onde a metodologia adotada é descrita neste capítulo.

3.1. Prospecção Tecnológica

Os estudos prospectivos têm como princípio a busca da compreensão das variáveis que influenciam o futuro, dando direção às transformações, que são fundamentais no auxílio das tomadas de decisão, pois através da coleta de informações do presente, é possível transformar essas informações em conhecimento. Na área da Ciência, Tecnologia e Informação (C, T&I), a prospecção tecnológica é importante para a organização dos sistemas de inovação que atendam aos interesses da sociedade. A prospecção tecnológica atua no mapeamento do desenvolvimento científico e tecnológico, sua influência na indústria, economia e sociedade, bem como na previsão das inovações tecnológicas que poderão obter êxito. Ressalta-se que o objetivo principal da prospecção tecnológica não é o de descobrir o futuro, mas de desenhar e analisar diferentes estratégias para alcançar o futuro almejado. Existem diferentes técnicas para realizar um estudo de prospecção tecnológica e estes métodos devem ser escolhidos de modo a atender da melhor forma os objetivos do estudo. Geralmente, se escolhem métodos de prospecção quantitativos e qualitativos para que ambos se complementem em termos de suas características e compensem as deficiências que a aplicação isolada de cada método pode trazer ao estudo (PARANHOS; RIBEIRO, 2018; SANTOS et al., 2004). No presente estudo, a técnica de prospecção escolhida foi a Análise de Patentes.

3.2. Análise de Patentes

O documento de Patente representa a propriedade intelectual sobre uma invenção, onde o inventor possui o monopólio sobre a inovação patenteada, por um período de tempo limitado, como contrapartida da exposição detalhada de sua descoberta, possibilitando um uso social mais abrangente. O detentor da patente pode

evitar que terceiros produzam, utilizem, vendam ou importem o produto ou a tecnologia de sua patente sem a sua permissão. Este documento é concedido por departamentos nacionais de patentes, sendo o direito de exclusividade válido apenas no país ou região na qual a patente foi depositada e concedida. As patentes desempenham um papel importante no incentivo à inovação, pois através da garantia da propriedade intelectual, o inventor possui um estímulo para o investimento de recursos na criação de novas tecnologias. Crescentemente, as estatísticas sobre patentes estão sendo utilizadas em estudos, como indicadores de resposta das atividades de invenção, podendo o número de patentes concedidas a uma empresa ou país refletir a sua dinâmica tecnológica (OECD, 1997; PARANHOS; RIBEIRO, 2018).

São considerados como documentos de patentes tanto pedidos que já foram publicados e que ainda não foram concedidos, como patentes concedidas em vigor e ainda patentes que já foram extintas. Estes documentos contêm, como elementos para busca de informações, o título, o resumo e uma folha de rosto que disponibiliza os dados bibliográficos essenciais, como por exemplo o país de origem, número do documento, instituição requerente ou depositante, data do pedido, da publicação e da concessão da patente, data do pedido original e seu número, nome do inventor e símbolos da Classificação Internacional de Patentes. A patente ainda é constituída por outros elementos como o quadro de reivindicações e uma descrição detalhada da invenção (BORSCHIVER; DA SILVA, 2016).

Nesse contexto, a Análise de Patentes é uma técnica que contribui para a geração de uma visão ampla sobre uma área tecnológica específica com base em informações geradas através de dados de patentes, o que auxilia na inovação de produtos e processos. Essa técnica permite adquirir informações de mercado, perceber quais empresas ou organizações estão investindo em P&D em determinado segmento, além de apontar possíveis novos mercados para determinada tecnologia. Na análise de patentes, também é possível o conhecimento dos principais inventores de determinado setor tecnológico, os países nos quais determinada patente foi concedida e o grau de interesse na área tecnológica, através da análise do número de patentes depositadas e de suas datas no período analisado. Um dos objetivos da análise de patentes é o mapeamento tecnológico, que consiste na identificação de

tendências tecnológicas, oportunidades, ameaças e como essas tendências se relacionam com estratégias de concorrentes, sendo assim uma ferramenta de inteligência competitiva (DAIM et al., 2006; PARANHOS; RIBEIRO, 2018).

O Mapeamento de patentes apresenta algumas etapas, com a busca podendo ser realizada em diversas bases de dados. As etapas da análise de patentes com o objetivo de mapeamento tecnológico são mostradas na Tabela 3.

Tabela 3 - Etapas do mapeamento de patentes

Análise de Patentes - Mapeamento Patentário	
Etapa	Descrição
1 ^a	Definição das melhores bases de dados a serem consultadas a depender do objetivo do mapeamento
2 ^a	Definição de escopo da busca patentária, desta forma garantindo a qualidade da metodologia utilizada
3 ^a	Realização do download dos documentos selecionados pelo escopo
4 ^a	Remoção das duplicidades, redundâncias e documentos espúrios
5 ^a	Preparo das planilhas para análises estatísticas e análises qualitativas

Fonte: Tabela criada pelo autor com informações retiradas de (RIBEIRO, 2018)

Com base nos passos acima, a 1^a etapa deste trabalho ficou definida como a Definição da Base de Dados, a 2^a etapa como a Busca por Patentes e a 3^a etapa como o Tratamento de Dados e Análise de Resultados, englobando a remoção de documentos que não fazem parte do escopo do trabalho, a realização de download dos documentos e o preparo das planilhas com a posterior realização de análise dos resultados.

3.2.1. Definição da Base de Dados

Existem diversas bases de dados de patentes disponíveis na internet de forma gratuita ou comercial. Dentre as bases de dados gratuitas, podem ser destacadas, a do Escritório de Marcas e Patentes dos Estados Unidos (USTPO, sigla em inglês) que disponibiliza as patentes americanas depositadas e concedidas no escritório, a Espacenet que pertence ao Escritório Europeu de Patentes e fornece acesso a mais de 100 milhões de patentes de mais de 100 países e a Patentscope, base de dados da Organização Mundial de Propriedade Intelectual (WIPO – sigla em

inglês), que disponibiliza mais de 77 milhões de patentes de diversos países. No Brasil, o Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) oferece uma base de dados que também é gratuita, porém apenas com documentos depositados e concedidos no país.

A escolha da base de dados é uma etapa fundamental da Análise de Patentes, pois cada base de dados abrange diferentes regiões ou países, oferecendo diferentes respostas à uma mesma busca. Na escolha da base de dados é importante levar em consideração o objetivo da busca, que poderá demandar uma determinada abrangência de jurisdições, custo de pesquisa, recursos de tratamento de dados, período da análise, entre outros fatores.

3.2.2. Busca por Patentes

Após definição da base de dados a ser consultada, foi realizada a busca de patentes, que pode ser feita seguindo diversas estratégias diferentes. As principais estratégias de busca de patentes englobam a pesquisa através de palavras-chave, por classificação de patentes ou por famílias de patentes, onde a escolha da estratégia de busca ideal depende do objetivo da pesquisa.

A estratégia adotada, consistiu em realizar uma busca com palavras-chave isoladas, para identificar quais termos retornam o maior número de patentes, dentro do escopo inicial do trabalho, de modo a ter o maior espaço amostral possível de patentes, para em seguida refinar a busca através da utilização de novas palavras-chave em conjunto com operadores Booleanos, com o objetivo de especificar a busca dentro do espaço amostral inicial. Algumas pesquisas de palavras-chave podem ser realizadas em todos os campos de texto das patentes, enquanto outras buscas por palavras-chave em campos de texto mais específicos.

Também foram utilizados truncamentos em algumas palavras-chave para que a busca englobasse diferentes termos que se referem ao mesmo objeto de busca. O truncamento de uma palavra-chave pode ser utilizado na busca de um conjunto de palavras, que possuem uma sequência de letras em comum.

Foram feitas diversas buscas, de forma iterativa, utilizando diferentes palavras-chave, com os resultados sendo computados em planilha no Excel para uma análise dos mesmos, permitindo a escolha dos termos que retornam o maior número

de patentes, de modo a definir a busca mais abrangente possível, dentro do escopo específico do trabalho.

3.2.3. Tratamento de Dados e Análise dos Resultados

Após finalizar a busca de patentes, foi feita uma leitura dos campos de títulos, resumos e reivindicações das patentes encontradas, de modo a garantir que as patentes encontradas representam o objetivo da busca. Algumas das patentes encontradas foram descartadas, ficando de fora da análise final de levantamento de informações, por não fazerem parte do escopo do trabalho.

Após selecionar os documentos de patentes que atendiam ao escopo do trabalho dentre as patentes encontradas, foi feito o *download* dos dados das patentes para o programa Excel, e em seguida foi realizada uma etapa de tratamento de dados e classificação das informações das patentes. Essa etapa consistiu na organização de patentes por data de prioridade, por países e regiões depositantes, por instituições depositantes e pelos grupos e sub-grupos da Classificação Internacional de Patentes (*International Patent Classification - IPC*). Além disso, foi feita uma leitura dos campos das patentes selecionadas, de modo a fazer uma análise detalhada das tecnologias desenvolvidas. Todas essas informações foram organizadas e processadas gerando gráficos e tabelas, que permitam uma análise mais profunda das informações.

A organização das patentes por ano da data de prioridade, possibilitou a verificação da evolução no número de depósitos através do tempo, além disso, o gráfico com o acúmulo de publicações ao longo do tempo possibilitou uma estimativa da fase do ciclo de vida tecnológico.

A classificação de patentes por país depositante, permitiu uma análise de quais nações ou regiões estão liderando o desenvolvimento tecnológico de determinado setor, possibilitando informações estratégicas sobre a evolução da tecnologia analisada. Além disso, os documentos publicados sendo organizados em relação às regiões onde foram publicados, permitiu a avaliação de quais regiões estão mais protegidas quanto à aplicação de tecnologias biometalúrgicas na recuperação de metais presentes em REEE.

A lista dos depositantes de patentes permitiu analisar quais foram as principais instituições, que estão trabalhando no desenvolvimento de novas

tecnologias em determinado campo. É interessante fazer um levantamento dos tipos de instituições que promoveram inovações no setor, bem como buscar informações mais detalhadas sobre as mesmas.

A Classificação Internacional de Patentes consiste no agrupamento das patentes e modelos de utilidade através da utilização de símbolos, onde cada código representa uma área tecnológica (WIPO, 2019). As patentes foram analisadas de acordo com os símbolos da classificação IPC mais recorrentes, de modo a identificar os principais símbolos que atendem à busca do presente trabalho.

Após a leitura das patentes, as mesmas foram organizadas quanto aos seus assuntos principais, de modo a analisar a essência das vertentes tecnológicas desenvolvidas nas inovações encontradas. Isso permitiu uma avaliação mais detalhada das reais aplicações das técnicas biometalúrgicas nos documentos de patentes.

Ao passo em que os resultados da análise de patentes foram gerados, foi realizada uma avaliação e discussão dos mesmos, com o objetivo de destacar as informações mais relevantes obtidas em cada uma das etapas. A avaliação dos resultados da análise também permitiu alcançar o objetivo do presente trabalho, que consistiu na prospecção tecnológica das técnicas de biometalurgia para a recuperação de metais, presentes em resíduos de equipamentos eletroeletrônicos.

4. Resultados e Discussão

4.1. Base de Dados Escolhida

A base de dados escolhida para realizar a busca de patentes, foi a Espacenet que pertence ao Escritório Europeu de Patentes (EPO, sigla em inglês). Os critérios principais para a escolha do Espacenet como base de dados utilizada na busca de patentes foram a sua abrangência de jurisdições, tendo em vista que essa base de dados disponibiliza acesso a mais de 100 milhões de documentos de patentes de mais de 100 países, o fato de ser uma base de dados gratuita, além de oferecer ótimas ferramentas de busca e de tratamento dos dados de resposta das pesquisas, incluindo a possibilidade de download da lista de patentes encontradas para o Excel, com informações sobre cada patente (EPO, 2019).

4.2. Busca de Patentes

A pesquisa no banco de dados de patentes do EPO foi realizada no dia 15 de dezembro de 2019. A estratégia de busca inicial consistiu na utilização de palavras-chave. Inicialmente foram realizadas buscas por diferentes termos, em inglês, fazendo referência aos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos. A Tabela 4 mostra as informações das buscas realizadas inicialmente.

Tabela 4 – Palavras-chave utilizadas na busca inicial de patentes com referência aos REEE

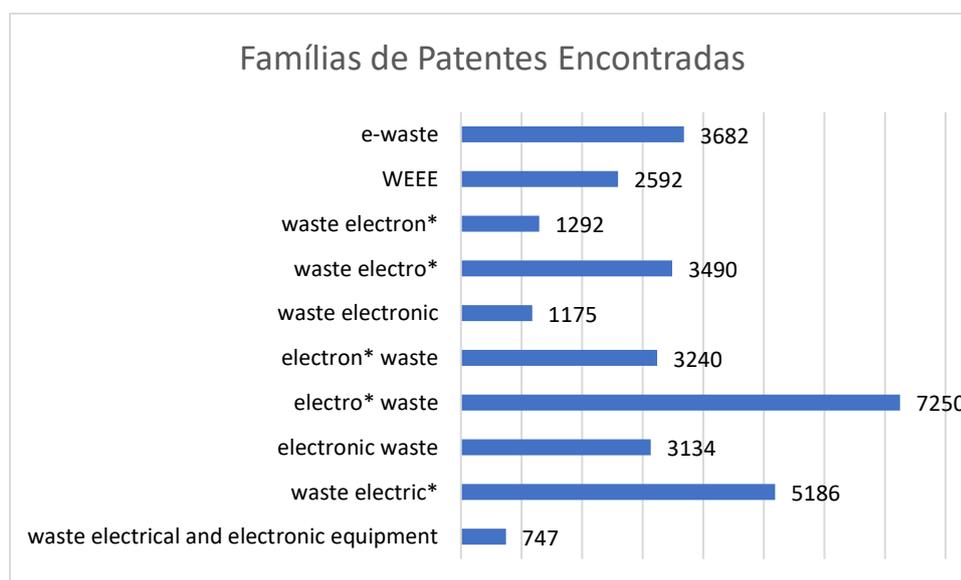
Operação	Campos	Palavra-Chave
=	<i>All text fields</i>	<i>waste electrical and electronic equipment</i>
=	<i>All text fields</i>	<i>waste electric*</i>
=	<i>All text fields</i>	<i>electronic waste</i>
=	<i>All text fields</i>	<i>electro* waste</i>
=	<i>All text fields</i>	<i>electron* waste</i>
=	<i>All text fields</i>	<i>waste electronic</i>
=	<i>All text fields</i>	<i>waste electro*</i>
=	<i>All text fields</i>	<i>waste electron*</i>
=	<i>All text fields</i>	<i>WEEE</i>
=	<i>All text fields</i>	<i>e-waste</i>

Fonte: Tabela criada pelo autor

A operação representada pelo sinal de igual (=) é equivalente ao uso de aspas em outras bases de dados de pesquisa. Essa operação indica que os resultados da busca por patentes retornam as patentes que contém o texto com as palavras-chave utilizadas na ordem exata em que foram escritas no campo de busca. O campo

de texto marcado como “*All text fields*” realiza a busca das palavras-chave em todos os campos de texto das patentes. O símbolo de asterisco (*), que representa o truncamento, possibilita uma busca onde diversas palavras podem ser formadas na sequência do termo anterior ao símbolo de truncamento. O resultado da busca inicial está representado na Figura 8.

Figura 8 - Resultados da busca inicial de patentes com referência aos REEE



Fonte: Figura criada pelo autor

Em seguida, foi selecionado o número mínimo de termos, dentre as palavras-chave acima, que retornaram o maior número de patentes, tendo em vista que a plataforma permite a busca de apenas 10 termos por campo de busca. Foi dada prioridade aos termos truncados, pois estes englobavam algumas das palavras-chave utilizadas. Foram realizadas novas buscas no campo “*All text fields*”, utilizando os termos selecionados, combinados pelo operador booleano OR. Durante esta busca, foi constatada outra limitação por parte da plataforma da base de dados e foi retornada uma mensagem de erro, onde mais de 30 mil termos eram cobertos pela busca que combinava os termos “waste electro*” OR “electro* waste”.

Com isso, foram realizadas novas combinações e os termos “waste electro*” e “electro* waste” foram substituídos por “waste electron*” e “electron* waste”, deixando os truncamentos mais específicos e fazendo com que a busca fosse realizada sem problemas. Além disso, esta substituição de termos truncados atendeu

melhor ao escopo do presente trabalho, pois o foco está nos resíduos eletrônicos. O resultado da busca das palavras-chave combinadas está na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados da busca abrangente de patentes que fazem referência aos REEE

Conector	Campos	Operação	Palavra-Chave	Famílias de Patentes Encontradas
	<i>All text fields</i>	=	<i>waste electric*</i>	
	<i>All text fields</i>	=	<i>electron* waste</i>	
OR	<i>All text fields</i>	=	<i>waste electron*</i>	13545
	<i>All text fields</i>	=	<i>WEEE</i>	
	<i>All text fields</i>	=	<i>e-waste</i>	

Fonte: Tabela criada pelo autor

O resultado de 13545 famílias de patentes representa o escopo da busca de patentes que fazem referência aos REEE no campo “*All text fields*” das patentes. A busca seguiu dentro desse grupo encontrado de famílias de patentes. A etapa seguinte da busca consistiu na recuperação de famílias de patentes que possuíam palavras-chave referentes a recuperação ou reciclagem de metais, onde estes termos estariam restritos aos campos “*Title, abstract or claims*” das patentes. Para realizar esta busca, os termos que fazem referência aos REEE pesquisados anteriormente, conectados pelo operador *OR* entre si, foram unidos através do operador booleano *AND* às palavras-chave que se referem à recuperação ou reciclagem de metais. É possível ver instruções sobre a utilização de operadores booleanos, truncamentos ou conectores de proximidades na plataforma do Espacenet na página do guia de bolso do Espacenet em (ESPACENET, 2019). Os resultados desta etapa da busca são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados das buscas de patentes com referência aos REEE e à reciclagem ou recuperação de metais

Conector	Campos	Operação	Palavra-Chave	Famílias de Patentes Encontradas
OR	<i>All text fields</i>	=	<i>waste electric*</i>	13545
	<i>All text fields</i>	=	<i>electron* waste</i>	
	<i>All text fields</i>	=	<i>waste electron*</i>	
	<i>All text fields</i>	=	<i>WEEE</i>	
	<i>All text fields</i>	=	<i>e-waste</i>	
<i>AND</i>				
-	<i>Title, abstract or claims</i>	<i>Proximity</i>	<i>in the same sentence as metal recovery</i>	616
-	<i>Title, abstract or claims</i>	<i>Proximity</i>	<i>in the same sentence as metals recovery</i>	290
-	<i>Title, abstract or claims</i>	<i>Proximity</i>	<i>in the same sentence as metal recovering</i>	473
-	<i>Title, abstract or claims</i>	<i>Proximity</i>	<i>in the same sentence as metals recovering</i>	260
-	<i>Title, abstract or claims</i>	<i>Proximity</i>	<i>in the same sentence as metal? recover???</i>	1034
-	<i>Title, abstract or claims</i>	<i>Proximity</i>	<i>in the same sentence as metal recycle</i>	97
-	<i>Title, abstract or claims</i>	<i>Proximity</i>	<i>in the same sentence as metals recycle</i>	36
-	<i>Title, abstract or claims</i>	<i>Proximity</i>	<i>in the same sentence as metal recycling</i>	565
-	<i>Title, abstract or claims</i>	<i>Proximity</i>	<i>in the same sentence as metals recycling</i>	192
-	<i>Title, abstract or claims</i>	<i>Proximity</i>	<i>in the same sentence as metal? recycl???</i>	777

Fonte: Tabela criada pelo autor

Novamente, foram selecionados os termos que retornaram o maior número de famílias de patentes. O truncamento realizado com o símbolo do ponto de interrogação (?) representa o conjunto de palavras que possui um ou nenhum dígito no local onde o símbolo se encontra. Os termos truncados englobam todas as tentativas de combinações testadas e foram escolhidos para realizar a busca com maior abrangência possível de patentes que fazem referência aos REEE (no campo “*All text fields*”) e também à reciclagem ou recuperação de metais (nos campos “*Title, abstract or claims*” nas patentes). Para conectar as palavras chave que se referiam

aos metais e às de reciclagem ou recuperação, foram utilizados conectores de proximidade. No caso acima, os termos “*metal?*” e “*recover???*” por exemplo, devem estar presentes na mesma sentença de pelo menos um dos campos pesquisados (“*Title, abstract or claims*”).

As palavras-chave que se referem aos REEE continuaram conectadas pelo operador *OR* entre si e pelo operador *AND* às palavras-chave selecionadas (termos com truncamento, pois estes retornam o maior número de resultados) que se referem à reciclagem ou recuperação de metais, sendo estes últimos termos conectados entre si, também por um operador booleano *OR*. A Tabela 7 detalha melhor a busca descrita acima e mostra o número de família de patentes encontradas.

Tabela 7 – Resultados da busca abrangente de famílias de patentes com referência aos REEE e à reciclagem ou recuperação de metais

Conector	Campos	Operação	Palavra-Chave	Famílias de Patentes Encontradas
<i>OR</i>	<i>All text fields</i>	=	<i>waste electric*</i>	13545
	<i>All text fields</i>	=	<i>electron* waste</i>	
	<i>All text fields</i>	=	<i>waste electron*</i>	
	<i>All text fields</i>	=	<i>WEEE</i>	
	<i>All text fields</i>	=	<i>e-waste</i>	
<i>AND</i>				
<i>OR</i>	<i>Title, abstract or claims</i>	<i>Proximity</i>	<i>in the same sentence as</i>	1342
	<i>Title, abstract or claims</i>	<i>Proximity</i>	<i>in the same sentence as</i>	
			<i>metal?</i>	
			<i>recover???</i>	
			<i>metal?</i>	
			<i>recycl???</i>	

Fonte: Tabela criada pelo autor

O resultado da busca acima, com 1342 famílias de patentes, reduz o escopo de patentes aos documentos que fazem referência aos REEE no campo “*All text fields*”, além de citar a reciclagem ou recuperação de metais nos campos “*Title, abstract or claims*”. Dentro deste novo escopo, foi realizada a última etapa de buscas, na qual, em sequência da busca acima, foi utilizado um novo conector booleano *AND* a diferentes palavras-chave que fazem referência à biometalurgia e suas técnicas de recuperação de metais, também no campo “*All text fields*”. O resultado se encontra na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados da busca de famílias de patentes com referência aos REEE, à reciclagem ou recuperação de metais e às técnicas de biometalurgia

Conector	Campos	Operação	Palavra-Chave	Famílias de Patentes Encontradas
OR	<i>All text fields</i>	=	<i>waste electric*</i>	13545
	<i>All text fields</i>	=	<i>electron* waste</i>	
	<i>All text fields</i>	=	<i>waste electron*</i>	
	<i>All text fields</i>	=	<i>WEEE</i>	
	<i>All text fields</i>	=	<i>e-waste</i>	
<i>AND</i>				
OR	<i>Title, abstract or claims</i>	<i>Proximity</i>	<i>in the same sentence as metal? recover???</i>	1342
	<i>Title, abstract or claims</i>	<i>Proximity</i>	<i>in the same sentence as metal? recycl???</i>	
<i>AND</i>				
-	<i>All text fields</i>	=	<i>biometallurgy</i>	24
-	<i>All text fields</i>	=	<i>biometallurgical</i>	15
-	<i>All text fields</i>	=	<i>biometallurg*</i>	30
-	<i>All text fields</i>	=	<i>bio*metallurg*</i>	33
-	<i>All text fields</i>	=	<i>bioleaching</i>	33
-	<i>All text fields</i>	=	<i>bio*leach*</i>	33
-	<i>All text fields</i>	=	<i>biosorption</i>	11
-	<i>All text fields</i>	=	<i>biosor*</i>	12
-	<i>All text fields</i>	=	<i>bioelectrochemical</i>	2
-	<i>All text fields</i>	=	<i>bioelectrochem*</i>	2
-	<i>All text fields</i>	=	<i>bio*electrochem*</i>	2
-	<i>All text fields</i>	=	<i>bioreduction</i>	0
-	<i>All text fields</i>	=	<i>bioprecipitation</i>	0
-	<i>All text fields</i>	=	<i>bio*precipitation</i>	0
-	<i>All text fields</i>	=	<i>bioaccumulation</i>	3
-	<i>All text fields</i>	=	<i>bioaccumula*</i>	7

Fonte: Tabela criada pelo autor

Além dos resultados da Tabela 8, também houve a tentativa de realizar a busca com o termo truncado “*bio**”, na expectativa de conseguir englobar todas as técnicas em uma busca mais abrangente possível, porém novamente a plataforma não permitiu a busca, pois a mesma abrangeu mais de 30 mil termos.

Com isso, novamente foram selecionados os termos que apresentaram o maior número de famílias de patentes como resposta. As palavras-chave que fazem referência às técnicas de biometalurgia e que foram pesquisadas em “*All text fields*”

foram agrupadas entre si por um conector booleano *OR* e conectadas ao resto das palavras-chave utilizadas anteriormente (que fazem referência aos REEE em “*All text fields*” e que fazem referência à reciclagem ou recuperação de metais nos campos de “*Title, abstract or claims*”) por um operador booleano *AND*.

O resultado desta busca retornou o maior número de famílias de patentes que fazem referência aos REEE, à recuperação ou reciclagem de metais e às técnicas de biometalurgia. A Tabela 9 mostra as informações e o resultado da busca final realizada:

Tabela 9 – Resultados da busca abrangente de famílias de patentes com referência aos REEE, à reciclagem ou recuperação de metais e às técnicas de biometalurgia

Conector	Campos	Operação	Palavra-Chave	Famílias de Patentes Encontradas
<i>OR</i>	<i>All text fields</i>	=	<i>waste electric*</i>	13545
	<i>All text fields</i>	=	<i>electron* waste</i>	
	<i>All text fields</i>	=	<i>waste electron*</i>	
	<i>All text fields</i>	=	<i>WEEE</i>	
	<i>All text fields</i>	=	<i>e-waste</i>	
<i>AND</i>				
<i>OR</i>	<i>Title, abstract or claims</i>	<i>Proximity</i>	<i>in the same sentence as metal? recover???</i>	1342
	<i>Title, abstract or claims</i>	<i>Proximity</i>	<i>in the same sentence as metal? recycl???</i>	
<i>AND</i>				
<i>OR</i>	<i>All text fields</i>	=	<i>bio*metallurg*</i>	68
	<i>All text fields</i>	=	<i>bioleaching</i>	
	<i>All text fields</i>	=	<i>biosor*</i>	
	<i>All text fields</i>	=	<i>bioelectrochemical</i>	
	<i>All text fields</i>	=	<i>bioaccumula*</i>	

Fonte: Tabela criada pelo autor

Ao fazer uma leitura inicial das patentes acima, verificou-se que um elevado número de patentes apenas citava termos referentes às técnicas de biometalurgia, mas com pouca relevância de fato nas invenções. Com isso, foi realizada uma nova busca, onde os termos que se referem às técnicas biometalúrgicas foram pesquisados nos campos “*Title, abstract or claims*”, com o intuito de recuperar os documentos onde estes termos possuem maior relevância dentro das invenções. Como o número de

documentos encontrados com as mesmas palavras-chave ficou muito reduzido, foi realizada a busca também com outros termos. Segue o resultado da busca realizada:

Tabela 10 – Resultados da busca de famílias de patentes com referência aos REEE, à reciclagem ou recuperação de metais e às técnicas de biometalurgia em campos de busca mais relevantes

Conector	Campos	Operação	Palavra-Chave	Famílias de Patentes Encontradas
OR	<i>All text fields</i>	=	<i>waste electric*</i>	13545
	<i>All text fields</i>	=	<i>electron* waste</i>	
	<i>All text fields</i>	=	<i>waste electron*</i>	
	<i>All text fields</i>	=	<i>WEEE</i>	
	<i>All text fields</i>	=	<i>e-waste</i>	
<i>AND</i>				
OR	<i>Title, abstract or claims</i>	<i>Proximity</i>	<i>in the same sentence as metal? recover???</i>	1342
	<i>Title, abstract or claims</i>	<i>Proximity</i>	<i>in the same sentence as metal? recycl???</i>	
<i>AND</i>				
-	<i>Title, abstract or claims</i>	=	<i>bio*metallurg*</i>	1
-	<i>Title, abstract or claims</i>	=	<i>bioleaching</i>	11
-	<i>Title, abstract or claims</i>	=	<i>biosor*</i>	6
-	<i>Title, abstract or claims</i>	=	<i>bioelectrochemical</i>	0
-	<i>Title, abstract or claims</i>	=	<i>microbial fuel cell</i>	2
-	<i>Title, abstract or claims</i>	=	<i>bioaccumula*</i>	1
-	<i>Title, abstract or claims</i>	=	<i>microorganism</i>	18
-	<i>Title, abstract or claims</i>	=	<i>microorganisms</i>	20
-	<i>Title, abstract or claims</i>	=	<i>micro?rganism?</i>	25
-	<i>Title, abstract or claims</i>	=	<i>microbe</i>	5
-	<i>Title, abstract or claims</i>	=	<i>microb*</i>	22
-	<i>Title, abstract or claims</i>	=	<i>biological</i>	31

Fonte: Tabela criada pelo autor

Os termos mais abrangentes e que retornaram o maior conjunto de patentes, que fazem referência às técnicas biometalúrgicas em “*Title, abstract or*

claims”, foram conectados pelo operador booleano *OR* entre si, e pelo conector *AND* aos termos citados anteriormente que se referem aos REEE em “*All text fields*” e à reciclagem ou recuperação de metais em “*Title, abstract or claims*”. De modo a permanecer dentro do limite de busca de no máximo 10 termos por campo de busca, e pelo fato do termo “*bio*metallurg**” retornar uma patente que já se encontrava no conjunto de patentes retornados pelas demais palavras-chave da busca, este termo foi descartado da busca final, porém a patente retornada permaneceu englobada no resultado final. Da mesma forma que, as patentes retornadas na busca pelo termo “*microbial fuel cell*” permaneceram no resultado final, ao se utilizar o termo truncado “*microb**” O resultado final da busca é apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultados da busca abrangente de famílias de patentes com referência aos REEE, à reciclagem ou recuperação de metais e às técnicas de biometalurgia em campos de busca mais relevantes

Conector	Campos	Operação	Palavra-Chave	Famílias de Patentes Encontradas
OR	<i>All text fields</i>	=	<i>waste electric*</i>	13545
	<i>All text fields</i>	=	<i>electron* waste</i>	
	<i>All text fields</i>	=	<i>waste electron*</i>	
	<i>All text fields</i>	=	<i>WEEE</i>	
	<i>All text fields</i>	=	<i>e-waste</i>	
<i>AND</i>				
OR	<i>Title, abstract or claims</i>	<i>Proximity</i>	<i>in the same sentence as metal? recover???</i>	1342
	<i>Title, abstract or claims</i>	<i>Proximity</i>	<i>in the same sentence as metal? recycl???</i>	
<i>AND</i>				
OR	<i>Title, abstract or claims</i>	=	<i>bioleaching</i>	61
	<i>Title, abstract or claims</i>	=	<i>biosor*</i>	
	<i>Title, abstract or claims</i>	=	<i>bioaccumula*</i>	
	<i>Title, abstract or claims</i>	=	<i>micro?rganism?</i>	
	<i>Title, abstract or claims</i>	=	<i>microb*</i>	
	<i>Title, abstract or claims</i>	=	<i>biological</i>	

Fonte: Tabela criada pelo autor

Como resultado da busca final, foram encontradas 61 famílias de patentes, sendo que destas, contabilizaram-se 91 documentos de patentes publicados. Não foi determinado um período de buscas, com isso, foram encontradas patentes com data de prioridade desde 1983 até 2019. As etapas seguintes foram realizadas a partir deste grupo de 61 famílias de patentes.

4.3. Tratamento de Dados e Análise de Resultados

Com a busca retornando 61 famílias de patentes, foi possível realizar a leitura dos campos de título, resumo e reivindicações de cada uma das patentes encontradas, de modo a verificar se os documentos correspondiam ao objetivo da pesquisa realizada. Ao fazer a leitura das patentes, constatou-se que 34 das 61 famílias de patentes encontradas correspondiam ao escopo desejado da busca, as demais patentes foram descartadas da análise. Segue a Tabela 12 com o número dos documentos de patentes que foram descartados da análise.

Tabela 12 - Patentes descartadas da análise

Nº	Nº Documento						
1	CA1227777A	8	WO2014044905A2	15	CN106413876A	22	CN107398251A
2	WO9705924A1	9	RO129433A2	16	CN204074682U	23	CN107988093A
3	US2006194299A1	10	US2016045841A1	17	CN104059712A	24	CN108400403A
4	GB2474362A	11	CN103304114A	18	WO2016009238A1	25	CN108486378A
5	CN102059043A	12	CN104630479A	19	CN104174639A	26	WO2019201765A1
6	CN103534368A	13	CN103552788A	20	CN106396244A	27	CN109570228A
7	CN102796874A	14	CN103599923A	21	CN107008733A	-	-

Fonte: Tabela criada pelo autor

Como algumas palavras-chave que faziam referência às técnicas de biometalurgia, que foram utilizadas na busca final (como por exemplo: “*biological*”, “*micro?rganism?*” e “*microb**”), eram mais abrangentes, as patentes acima não atenderam ao objetivo real da busca. No entanto, a utilização destas palavras permitiu que mais patentes que fazem parte do escopo deste trabalho fossem encontradas.

Na Tabela 13 estão destacados os números dos documentos das patentes que fazem parte do escopo do presente trabalho e que foram selecionadas para a análise.

Tabela 13 – Relação das patentes analisadas e status de seus documentos

Nº Documento	Status da patente	Nº Documento	Status da patente
RU2115751C1	concedida	CN105420500B	concedida
CN100404705C	concedida	CN105886775A	publicada
KR101276660B1	concedida	CN106947866A	publicada
EP3008220B1	concedida	CA3040237A1	publicada
SG10201403763VA	não identificada	WO2018084723A2	publicada
CN103397195B	concedida	CN107119194B	concedida
CN104785212B	concedida	CN106967636A	concedida
WO2015137922A1	publicada	KR20190036607A	publicada
CN104073639B	concedida	WO2019078735A1	publicada
JP2016054736A	publicada	CN107746959B	concedida
CN104312955B	concedida	CN109943721A	publicada
CN104328283B	concedida	EP3502285A1	publicada
CN104607443B	concedida	ES2707353B2	concedida
KR20160135088A	publicada	CN109082525A	publicada
KR101751111B1	concedida	CN109680153A	publicada
CN105039704A	publicada	CN109628357A	publicada
EP3127874A1	publicada	CN109943723A	publicada

Fonte: Tabela criada pelo autor

É importante observar que das 34 famílias de patentes encontradas na busca, 16 destas famílias tiveram documentos de patentes já concedidos, enquanto 17 famílias de patentes tiveram apenas suas invenções publicadas. A publicação do documento não garante a propriedade intelectual sobre a invenção reivindicada. Não foi possível encontrar o status do documento de uma das famílias de patentes, com o número SG10201403763VA.

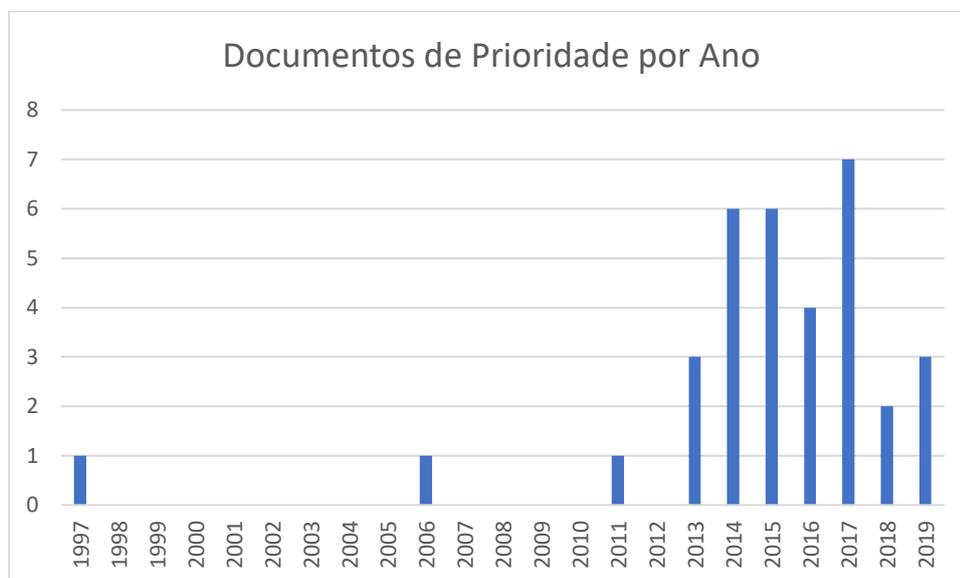
A plataforma Espacenet possibilita a realização do *Download* da lista de famílias de patentes selecionadas, em conjunto com diversas informações sobre as patentes e de filtros disponibilizados na plataforma no formato do programa Excel.

Após realizar o *Download*, os dados foram organizados por ano de prioridade, por região do documento de prioridade das patentes, por depositante, pela Classificação IPC e por assunto ou tecnologia biometalúrgica utilizada na invenção, bem como uma análise dos pontos mais relevantes encontrados nas patentes.

4.3.1. Análise das famílias de patentes por ano e região de depósito

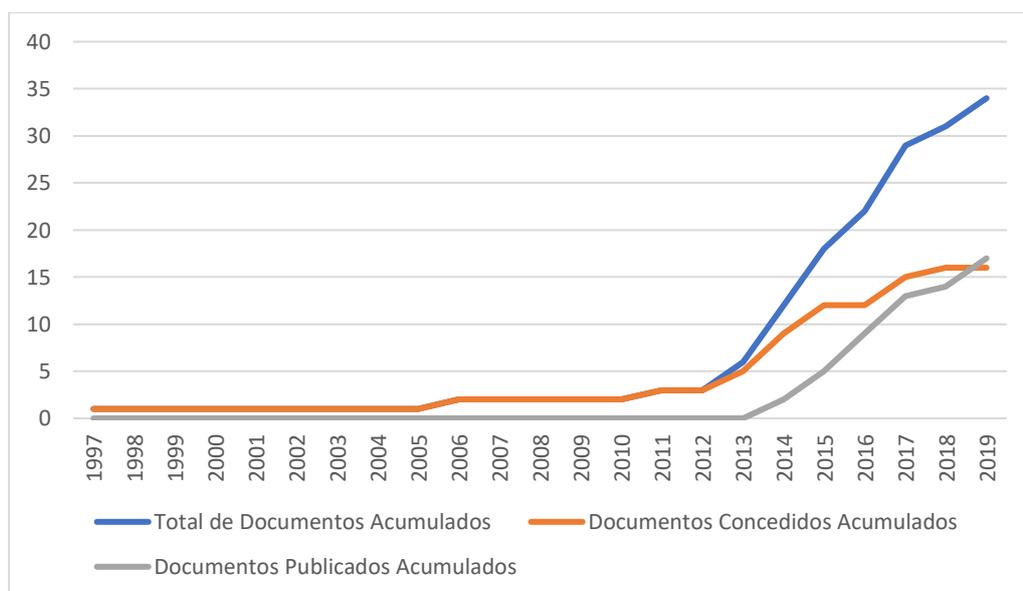
Ao classificar as famílias de patentes por ano de prioridade, foram obtidos os gráficos das Figuras 9 e 10.

Figura 9 – Número de documentos de prioridade das famílias de patentes encontradas por ano



Fonte: Figura criada pelo autor

Figura 10 – Número de documentos de prioridade acumulados ao longo do tempo



Fonte: Figura criada pelo autor

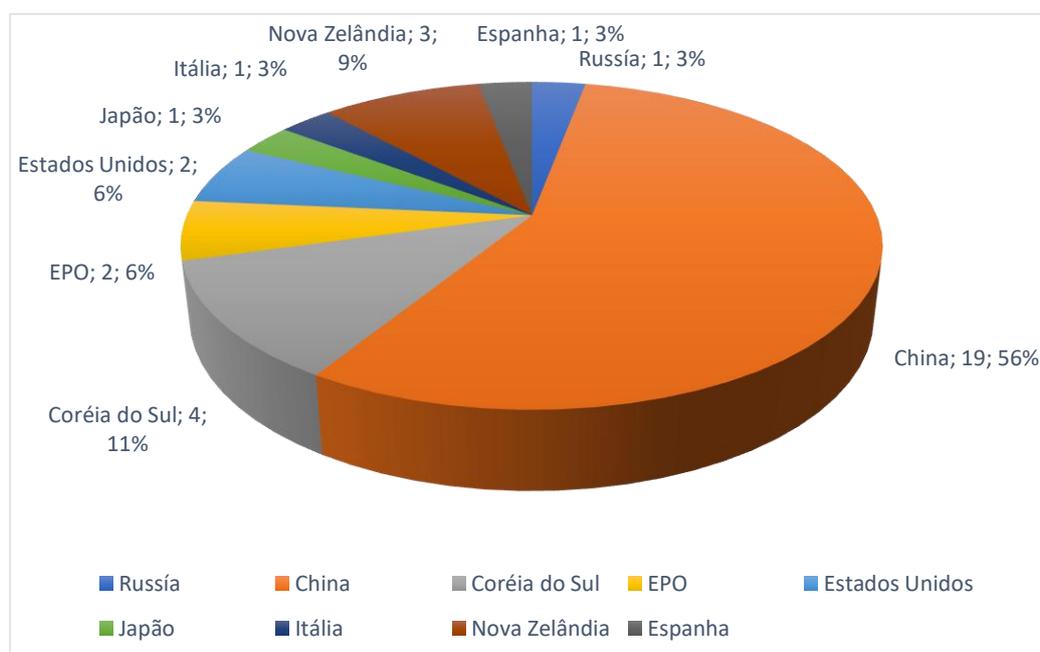
Como destacado nas Figuras 9 e 10, o primeiro depósito encontrado foi no ano de 1997, passando por poucos documentos durante a década de 2000 e com um

aumento das invenções na última década (2011 – 2020). O número de famílias de patentes encontradas na busca e o formato do gráfico na Figura 10 sugerem que as tecnologias pesquisadas estão em fase inicial em seu desenvolvimento tecnológico, ou em uma etapa emergente do ciclo de vida tecnológico.

As Figuras 9 e 10 mostram um aumento do interesse na recuperação de metais, presentes em REEE, por técnicas de biometalurgia na década atual. Tanto documentos de prioridade de patentes concedidas quanto de patentes reivindicadas se encontram em momento crescente de publicações. Dentre as ações que podem ter contribuído para despertar o interesse neste tema, é possível citar a publicação do relatório de matérias-primas críticas para a União Europeia, que reconhece a escassez de um conjunto de recursos estratégicos do ponto de vista econômico para os países do continente, além de apresentar uma lista com as matérias-primas consideradas críticas (EUROPEAN COMMISSION, 2010). Diversos metais presentes em resíduos de equipamentos eletroeletrônicos estão presentes nesta lista.

Os documentos das famílias de patentes também foram organizados pela região onde foram depositados os documentos de prioridade. A Figura 11 mostra a distribuição desses depósitos por região.

Figura 11 - Distribuição de depósito dos documentos de prioridade



Fonte: Figura criada pelo autor

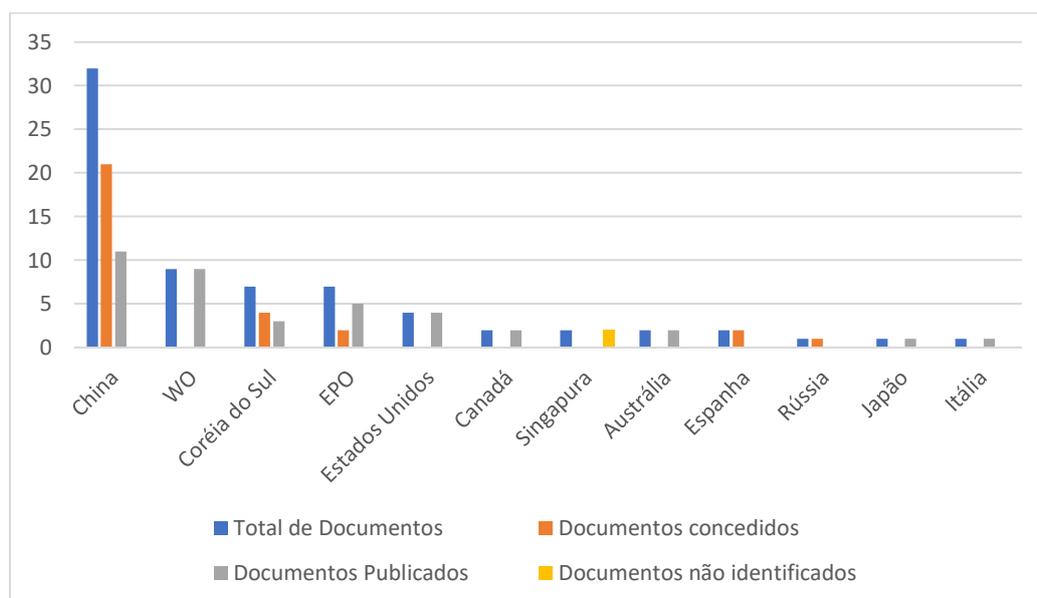
A Figura 11 mostra que o maior número de depósitos de documentos de prioridade foi realizado na China (19), seguido pela Coreia do Sul (4), ambos países asiáticos. Outro país asiático com depósito do documento de prioridade foi o Japão, porém apenas com 1 documento. No total, a região dos países europeus apresenta 5 documentos de prioridade depositados, mas distribuídos entre diferentes países. O código EP aparece duas vezes dentre os números de documentos de prioridade e indica que determinada patente está sob administração do Escritório Europeu de Patente (EPO). Itália, Espanha e Rússia possuem um depósito de documento de prioridade cada um. Na Oceania, a Nova Zelândia aparece com 3 depósitos de documentos e prioridade, enquanto que os Estados Unidos aparecem com 2 depósitos representando a América do Norte.

O protagonismo chinês no número de publicações de patentes pode ser explicado pela adoção, por parte do governo da China, do programa de Construção de Base de Demonstração de Mineração Urbana (UMDBC, sigla em inglês), com início em 2010. O principal motivo para a criação deste programa se deve ao fato da China ser o maior produtor e consumidor de recursos e energia do mundo, tendo um valor de recursos domésticos *per capita* muito abaixo da média mundial. É difícil para a China atender suas reais necessidades de desenvolvimento econômico e social com a oferta atual de recursos, além da necessidade de o desenvolvimento no país acontecer de forma sustentável. O governo chinês espera que este programa ajude a atingir metas ambientais e de gestão de recursos (HU; POUSTIE, 2018). Este programa, com início em 2010, também pode ter alavancado o interesse, na década atual, pelas tecnologias pesquisadas como está destacado nas Figuras 9 e 10, tendo em vista que a China foi o país que mais publicou documentos de prioridade dentre as patentes analisadas.

4.3.2. Análise das regiões potencialmente protegidas

As 34 famílias de patentes encontradas na busca contêm no total 70 publicações de documentos de patentes, tendo em vista que uma família de patente pode conter diversos documentos depositados em diferentes países ou regiões. Esses documentos (publicados ou concedidos) foram ordenados por país ou região onde foram depositados, o que reflete as regiões onde as tecnologias estão potencialmente mais protegidas. A Figura 12 mostra o resultado encontrado.

Figura 12 - Regiões onde as tecnologias pesquisadas estão potencialmente mais protegidas



Fonte: Figura criada pelo autor

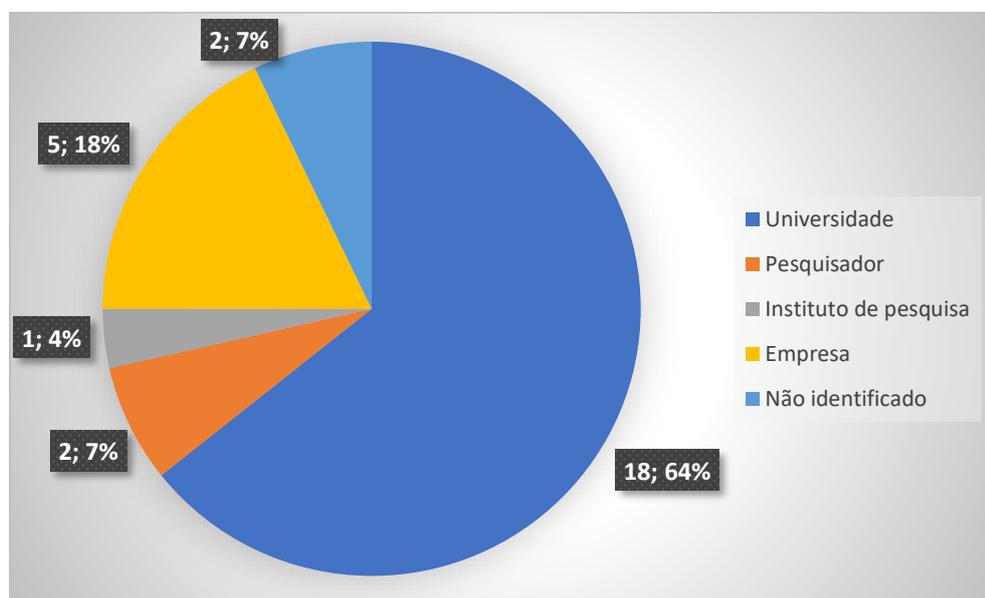
A China aparece mais uma vez em evidência como a região onde as patentes das técnicas biometalúrgicas aplicadas na recuperação de metais presentes em REEE estão mais protegidas. O país aparece na liderança tanto de documentos concedidos, quanto documentos apenas publicados. Em segundo lugar estariam os documentos de publicação internacional sob o Tratado de Cooperação em Patentes (PCT, sigla em inglês), que são pedidos internacionais arquivados em qualquer escritório receptor da PCT, com a sigla WO, no entanto estes documentos não foram concedidos ainda. A Coreia do Sul tem notoriedade novamente como a segunda referência no continente asiático, tanto com documentos concedidos quanto apenas publicados. Além dos países abrangidos pelo Escritório Europeu de Patentes (EPO), com a sigla EP, e os países europeus Espanha e Rússia, com documentos de patentes já concedidos, fazendo com que o bloco de países europeus seja mais uma vez uma região de importância. Os documentos encontrados depositados em Singapura não tiveram seu status identificado.

Os Estados Unidos também aparecem como uma região destacada de interesse na proteção tecnológica, porém ainda não possui documentos concedidos, dentre os encontrados nesta busca. Canadá, Austrália, Japão e Itália possuem documentos publicados que ainda não foram concedidos.

4.3.3. Análise das principais instituições depositantes de patentes

As famílias de patentes também foram classificadas por seus respectivos depositantes. A Figura 13 mostra o perfil das instituições depositantes das famílias de patentes encontradas na busca realizada.

Figura 13 - Perfil das instituições depositantes das patentes



Fonte: Figura criada pelo autor

O resultado ilustrado na Figura 13 ressalta a fase inicial deste tipo de tecnologia, tendo em vista que a grande maioria dos documentos de prioridade encontrados na busca foi depositada por instituições acadêmicas e de pesquisa. O pequeno número de empresas depositantes reflete a situação embrionária das técnicas biometalúrgicas no mercado de recuperação ou reciclagem de metais presentes em resíduos eletrônicos.

Algumas instituições depositantes com destaque foram analisadas mais detalhadamente através da consulta de seus *websites*, para se obter maiores informações sobre as mesmas. Dentre elas, citam-se as empresas Mint Innovation Limited e BRAIN AG, além das instituições acadêmicas Academia de Ciências Chinesa e a Segunda Universidade Politécnica de Xangai.

A empresa Neozelandesa Mint Innovation Limited, fundada em 2016, trabalha com a recuperação de metais valiosos, presentes em fluxos de resíduos

eletroeletrônicos. A empresa desenvolveu tecnologia que utiliza microrganismos seletivos na recuperação de metais específicos. O principal objetivo da empresa é atuar na captura de valor de resíduos eletroeletrônicos, próximo ao seu ponto de coleta, tornando o processo viável tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental. A empresa se intitula a primeira biorrefinaria do mundo a usar microrganismos na extração de metais preciosos de fluxos complexos de resíduos, além de comparar sua planta à de uma microcervejaria por sua flexibilidade no processamento de placas de circuito impresso em qualquer escala, local e com baixo custo (MINT INNOVATION, 2019; MINT INNOVATION LINKEDIN, 2019). A Mint Innovation possui o maior número de publicações de documentos de prioridade dentre as patentes encontradas (3 documentos), porém nenhum ainda foi concedido. Em todos estes documentos reivindicados pela Mint Innovation, foi utilizada a técnica de bioissorção. A reportagem (MCBETH, 2018) sobre a empresa, publicada em dezembro de 2018 no site scoop, classifica a Mint Innovation como uma startup cleantech e diz que a empresa está executando projeto piloto, mas que pretende aumentar sua escala com o objetivo de iniciar suas operações comerciais em 2020.

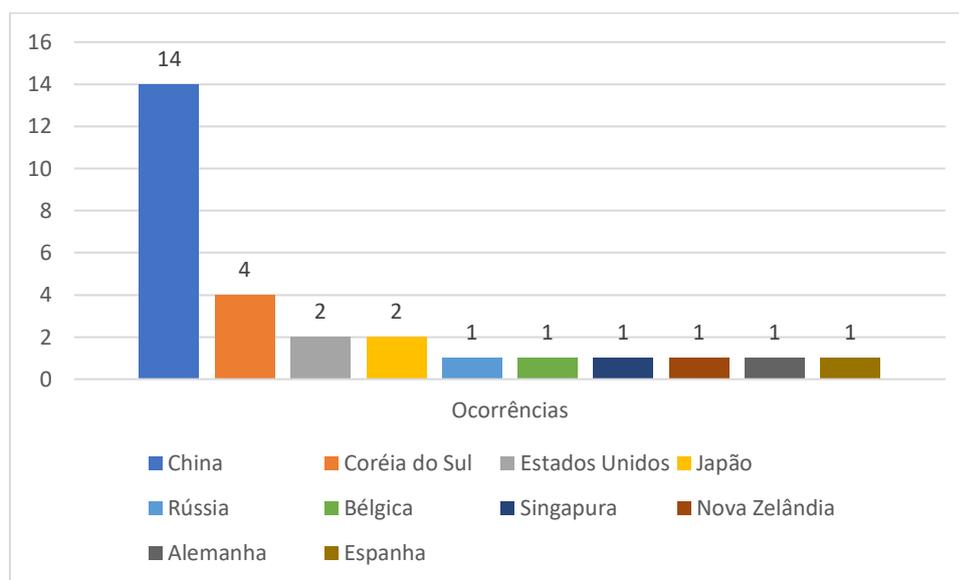
A empresa BRAIN AG é o centro de inovação e atua como sede do grupo internacional BRAIN. A empresa diz ser pioneira nos campos de biotecnologia industrial e bioeconomia desde sua fundação em 1993 e que seu foco está na pesquisa e desenvolvimento de produtos naturais bioativos, enzimas personalizadas e microrganismos de alto desempenho para empresas do grupo e para seus clientes e parceiros. A BRAIN diz ter desenvolvido tecnologia baseada em microrganismos, em seus programas de mineração verde e urbana, que foi transferido de escala laboratorial para nível de tonelada métrica (BRAIN, 2019; BRAIN AG, 2019). A BRAIN AG possui uma publicação de documento de prioridade encontrado na busca, que ainda não foi concedido, que utiliza a biolixiviação na recuperação de prata e ouro de REEE.

Outra instituição depositante de destaque é a Academia de Ciência Chinesa (CAS, sigla em inglês), com 3 publicações de documentos de prioridade diferentes. Fundada em 1949, foi formada por diversos institutos de ciência existentes, sendo de fundamental importância para o desenvolvimento em ciência e tecnologia na China desde seus primeiros anos de existência. A instituição participou de todos

os planos nacionais de desenvolvimento em ciência e tecnologia da China. A Academia de Ciência China 104 institutos de pesquisa espalhados pelo país (CHINESE ACADEMY OF SCIENCES, 2020). Dentre as patentes analisadas, três diferentes institutos da Academia de Ciências Chinesa publicaram documentos de prioridade. São eles, o Instituto de Engenharia de Processos, o Instituto de Meio Ambiente Urbano e a Estação de Observação e Pesquisa do Ambiente Urbano de Ningbo.

A Segunda Universidade Politécnica de Xangai é uma universidade pública municipal, onde o foco é a Engenharia. Fundada em 1960, é uma instituição de ensino superior de destaque, com foco no serviço ao desenvolvimento social e à construção econômica, e forma estudantes com capacidades técnicas e práticas. A Universidade possui um centro de inovação colaborativa para a reciclagem de REEE, onde realiza pesquisas em diversos setores referentes aos resíduos eletroeletrônicos, entre eles o desenvolvimento de tecnologias e equipamentos e o treinamento de profissionais. O centro de reciclagem de REEE da Segunda Universidade Politécnica de Xangai atua de forma conjunta com diversas instituições, sejam empresas privadas, autoridades governamentais, além de outras universidade e institutos de pesquisa (UNIVERSIDADE POLITÉCNICA DE XANGAI, 2020; WEEE CENTER UNIVERSIDADE POLITÉCNICA DE XANGAI, 2020). Este centro de reciclagem de REEE aparentemente é uma referência que conecta diversos atores Chineses que trabalham na gestão dos resíduos eletroeletrônicos.

Os depositantes também foram organizados pelo seu país de origem e o resultado é mostrado na Figura 14.

Figura 14 - Depositantes por país de origem

Fonte: Figura criada pelo autor

Como esperado, a China possui o maior número de depositantes e, em sua grande maioria, instituições acadêmicas. É possível observar também, que há uma grande distribuição dos depositantes entre os países europeus, com depositantes de 4 países deste continente. Na Ásia, apesar da supremacia chinesa, também há instituições depositantes na Coréia do Sul, Singapura e Japão. Este último é um país reconhecido pela forma como reaproveita seus resíduos. A Ásia é o continente com o maior número de instituições depositantes encontradas na busca de patentes. Ainda houveram instituições depositantes dos Estados Unidos na América do Norte e da Nova Zelândia na Oceania.

4.3.4. Análise da Classificação IPC

Os símbolos da classificação IPC foram contabilizados em planilha no programa Excel, de acordo com o número de ocorrências nas patentes selecionadas para análise. É importante ressaltar que os códigos da classificação IPC são formados por um conjunto de símbolos hierárquicos, que possuem seções, classes, subclasses, grupos e subgrupos, ordenados de forma decrescente em sua abrangência tecnológica. Esta classificação através de símbolos permite que as patentes que tratam do mesmo campo tecnológico possam ser agrupadas independente de seu idioma. A Tabela 14 mostra os grupos da classificação IPC mais recorrentes entre as patentes analisadas.

Tabela 14 - Grupos IPC mais recorrentes entre as patentes analisadas

Grupos IPC	Classificação (Grupo)	Ocorrências
C22B3	Extração de compostos metálicos de minerais ou concentrados de processos úmidos	31
C22B7	Processamento de matérias-primas outras que não são minerais p. ex. sucata, um fim de produção de metais não ferrosos ou seus compostos	20
C22B15	Obtenção de cobre	10
C22B11	Obtenção de metais nobres	8
C02F1	Tratamento de água, águas residuais ou esgotos	8
C02F3	Tratamento biológico de água, águas residuais ou esgotos	6
C12N1	Micro-organismos p. ex. protozoários; Suas composições; Processos de propagação, manutenção ou conservação de micro-organismos ou suas composições; Processos de preparação ou isolamento de composições contendo um microorganismo; Meios de cultura para tal	6
C25C1	Produção, recuperação ou refinação eletrolítica de metais por eletrólise de soluções	5
C12R1	Micro-Organismos	5
H05K1	Circuitos impressos	4
C02F103	Natureza da água, água residual, esgoto ou lodo a ser tratado	4

Fonte: Tabela criada pelo autor

Para entender melhor as classificações apresentadas na Tabela 14, foi necessário conhecer as seções, classes e subclasses dos símbolos presentes na Tabela 14. A Tabela 15 esquematiza o significado destes símbolos.

Tabela 15 - Classificação das seções, classes e subclasses principais da análise de patentes

Subclasses IPC	Classificação (seção / classe / subclasse)
C22B	Química; Metalurgia / Metalurgia; Ligas ferrosas ou não-ferrosas; Tratamento de ligas ou de metais não-ferrosos / Produção ou refino de metais; Pré-tratamento de matérias-primas
C02F	Química; Metalurgia / Tratamento de água, de águas residuais, de esgotos ou de lamas e lodos / Tratamento de água, de águas residuais, de esgotos ou de lamas e lodos
C12N	Química; Metalurgia / Bioquímica; Cerveja; Álcool; Vinho; Vinagre; Microbiologia; Enzimologia; Engenharia Genética ou de Mutação / Micro-organismos ou Enzimas; suas composições; Propagação, Conservação, ou manutenção de micro-organismos; Engenharia Genética ou de Mutações; Meios de cultura
C12R	Química; Metalurgia / Bioquímica; Cerveja; Álcool; Vinho; Vinagre; Microbiologia; Enzimologia; Engenharia Genética ou de Mutação / Esquema de indexação associado às subclasses C12C-C12Q, relativo a micro-organismos
C25C	Química; Metalurgia / Processos Eletrolíticos ou Eletroforéticos; Aparelhos para este fim / Processos para a produção, a recuperação, ou refino eletrolítico dos metais; Aparelhos para este fim
H05K	Eletricidade / Técnicas elétricas não incluídas em outro local / Circuitos impressos; Invólucros ou detalhes estruturais de aparelhos elétricos; Fabricação de conjuntos de componentes elétricos

Fonte: Tabela criada pelo autor

Foi possível verificar que um número considerável de patentes faz referência ao tratamento de águas residuais. Isso pode ocorrer pelo fato de algumas das técnicas biometalúrgicas serem utilizadas na recuperação de metais pesados no tratamento de efluentes, como é o caso, por exemplo, da bioissorção (CHAUHAN; UPADHYAY, 2015).

Além disso, é possível analisar que a subclasse C22B teve um grande número de ocorrências na classificação de patentes e a maior variedade de grupos associados. A seção C trata de química e metalurgia e a classe 22 desta seção está associada a metalurgia, ligas ferrosas ou não-ferrosas, tratamento de ligas ou metais não-ferrosos. Já a subclasse B se refere à produção ou refino de metais ou Pré-tratamento de matérias-primas. A Tabela 16 mostra todos os grupos da subclasse C22B que foram encontrados na busca realizada.

Tabela 16 - Grupos da Subclasse C22B da classificação IPC encontrados na busca de patentes realizada

Grupos IPC	Classificação (grupo)	Ocorrências
C22B3	Extração de compostos metálicos de minerais ou concentrados de processos úmidos	31
C22B7	Processamento de matérias-primas outras que não são minerais p. ex. sucata, um fim de produção de metais não ferrosos ou seus compostos	20
C22B15	Obtenção de cobre	10
C22B11	Obtenção de metais nobres	8
C22B19	Obtenção de zinco ou óxido de zinco	2
C22B23	Obtenção de níquel ou cobalto	2
C22B34	Obtenção de metais refratários	2
C22B1	Pré-tratamento de minérios ou sucatas	1
C22B17	Obtenção de cádmio	1
C22B47	Obtenção do manganês	1
C22B13	Obtenção do chumbo	1
C22B21	Obtenção do alumínio	1
C22B25	Obtenção do estanho	1
C22B59	Obtenção de metais terras raras	1

Fonte: Tabela criada pelo autor

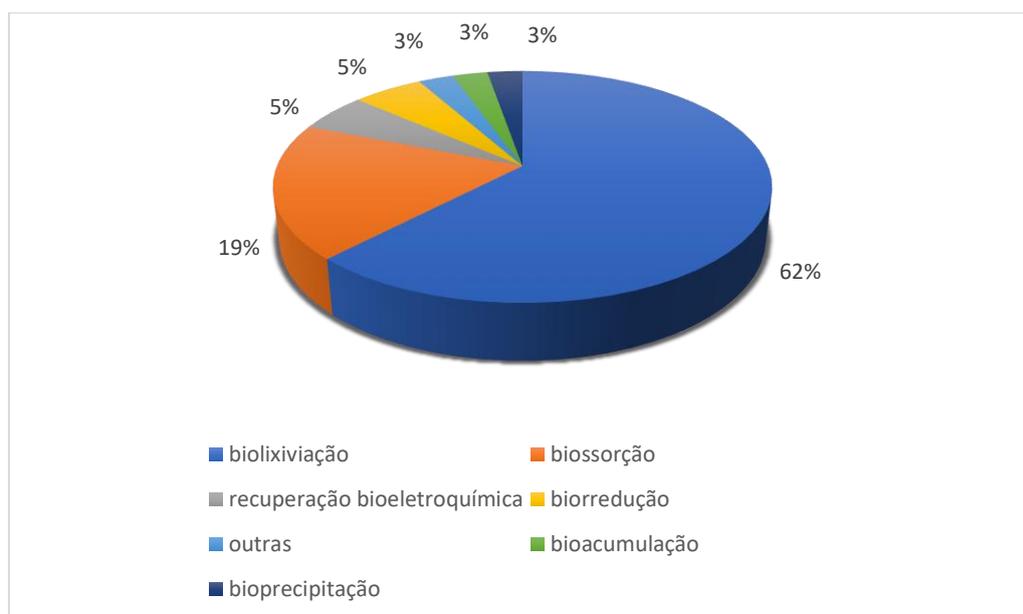
A Subclasse C22B está associada à obtenção de diversos metais. Os grupos que tiveram o maior número de ocorrências nas patentes encontradas foram C22B3 e C22B7. O primeiro grupo trata da extração de compostos metálicos de minerais ou concentrados de processos úmidos. O Subgrupo com o maior número de ocorrências foi o C22B3/18, com 22 ocorrências, e o significado é o auxílio de

microrganismos ou enzimas, por exemplo, bactérias ou algas. Esta categoria provavelmente faz referência à biolixiviação, que é um processo de extração de metais por via úmida e que ocorre com o auxílio de microrganismos. Já o grupo C22B7 faz referência ao processamento de matérias-primas outras que não são minerais, por exemplo, sucata, ou ao fim de produção de metais não-ferrosos e seus compostos. Esta classificação é bastante ampla, principalmente dentro do escopo deste trabalho, onde a recuperação de metais ocorre pelo tratamento de resíduos. É possível verificar também o número considerável de ocorrências dos grupos C22B15 e C22B11, que se referem à obtenção de cobre e de metais nobres, respectivamente, indicando que uma boa parte dos documentos se refere à recuperação destes metais.

4.3.5. Análise das principais vertentes tecnológicas

Com a leitura do campo de descrição de todas as patentes encontradas, os documentos foram organizados de acordo com sua vertente tecnológica, ou seja, de acordo com a técnica biometalúrgica utilizada na invenção. A Figura 15 mostra o resultado desta análise.

Figura 15 – Distribuição das técnicas biometalúrgicas nas patentes encontradas

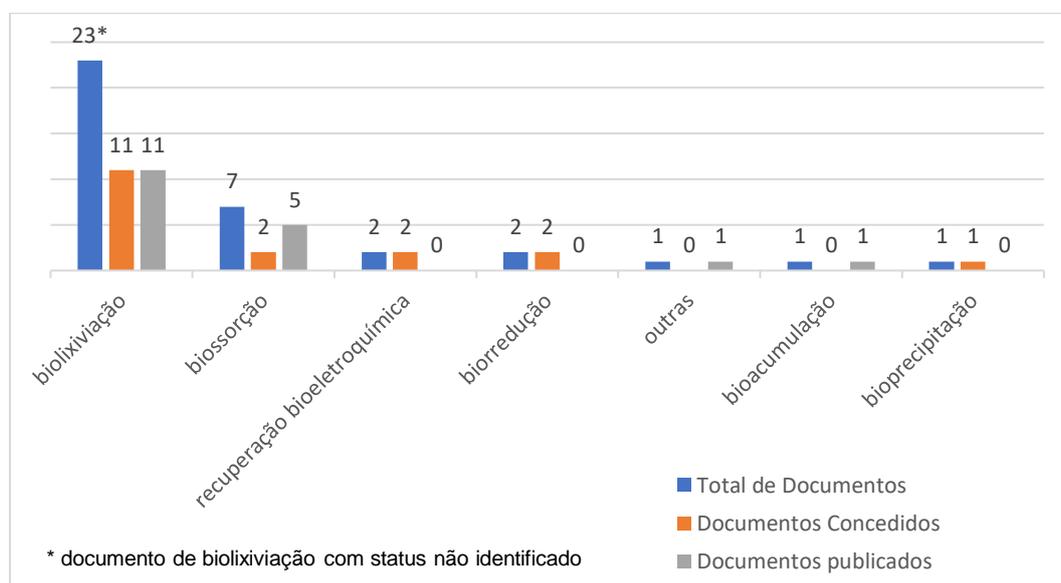


Fonte: Figura criada pelo autor

O resultado acima mostra que existe um desenvolvimento tecnológico maior no campo da biolixiviação em relação aos outros métodos biometalúrgicos, tendo em vista que este método apareceu em 62% das patentes analisadas. Em

segundo lugar aparece a técnica de bioissorção, com participação relevante nas invenções analisadas (19%). Os demais métodos apresentaram uma menor contribuição tecnológica nas invenções encontradas, com a recuperação bioeletroquímica e biorredução com aproximadamente 5% de participação nas patentes encontradas. Já as técnicas de bioacumulação e bioprecipitação aparecem com 3% de presença nos documentos. Ainda um documento apresentou outra possibilidade de recuperação de metais presentes em REEE através da utilização de microrganismos, também representando 3% do total. Os campos da biolixiviação e da bioissorção são considerados os principais da biometalurgia, como relatado no artigo científico (ILYAS; LEE, 2014). A Figura 16 mostra a distribuição das vertentes tecnológicas da biometalurgia entre as famílias de patentes já concedidas ou apenas publicadas.

Figura 16 - Distribuição de vertentes biometalúrgicas por famílias de patentes com documentos concedidos ou publicados



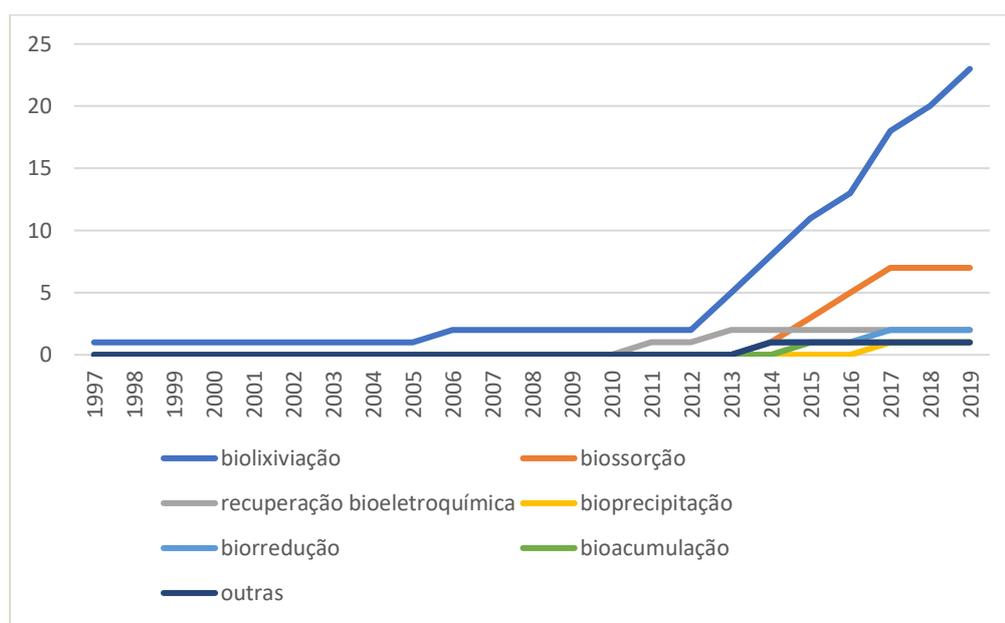
Fonte: Figura criada pelo autor

O resultado acima mostra que, dentre os documentos de famílias de patentes encontrados, existem mais documentos apenas publicados de bioissorção do que documentos já concedidos. Também chama a atenção que todos os documentos encontrados das técnicas de recuperação bioeletroquímica, biorredução e bioprecipitação foram documentos já concedidos. Entretanto, mais da metade dos documentos de biolixiviação encontrados ainda não foram concedidos. Houve ainda

um documento não concedido, que propõe um outro método envolvendo microrganismos para a recuperação dos metais.

Os dados das técnicas biometalúrgicas foram cruzados com o ano de prioridade de cada documento, gerando um gráfico que mostra a evolução da publicação dos documentos por técnica aplicada. O resultado é mostrado na Figura 17.

Figura 17 - Evolução na publicação de documentos de prioridade por técnica biometalúrgica ao longo do tempo



Fonte: Figura criada pelo autor

É possível observar que a biolixiviação possui sua primeira publicação, dentre os documentos de prioridade encontrados, ainda na década de 90, sendo uma técnica mais antiga e, portanto, com mais tempo para o seu desenvolvimento tecnológico. Também é possível verificar que a recuperação bioeletroquímica possui sua primeira publicação antes da técnica de biossorção, que ultrapassou as demais no número de publicações nos últimos anos. Apesar do método de biolixiviação apresentar publicações antes do período de 2011 até 2019, o salto no número de publicações ocorreu nesta década de forma conjunta com as demais.

Algumas invenções de destaque foram selecionadas para serem discutidas neste tópico a fim de expor as principais aplicações das técnicas biometalúrgicas

observadas. Estas patentes foram escolhidas por apresentarem o maior número de citações dentre os documentos encontrados, o que pode representar uma maior relevância no futuro do desenvolvimento tecnológico na recuperação de metais via biometalurgia.

Alguns documentos de patentes oferecem diferentes soluções tecnológicas para aumentar o rendimento ou a velocidade da lixiviação biológica. A invenção relatada no documento, com 3 citações, concedido de número EP3008220B1 (NICOLAY; VAUCHEL, 2016) descreve a técnica de biolixiviação com imobilização de cultura bacteriana em matriz de incorporação ou imobilização por encapsulamento, o que garante que o processo ocorra mesmo sob condições adversas, que seria a presença de inibidores metabólicos ou componentes tóxicos aos microrganismos. Já a patente (4 citações) (CN106947866A) publicada (HAN et al., 2017), relata método de biolixiviação em que águas residuais de decapagem fornecem o ferro utilizado na lixiviação e são utilizadas na solução de cultivo dos microrganismos. Neste processo, a primeira etapa consiste na lixiviação química de Pb, Zn, Al, Fe e Sn, seguida pela biolixiviação de cobre pela oxidação de íons ferrosos. A invenção, com 4 citações, relatada no documento publicado (BAI et al., 2016) com o número CN105886775A, descreve a utilização de um eletrodo de pano de carbono modificado com grafeno, que acelera a taxa de transferência de elétrons no meio em que ocorre a biolixiviação de cobre, também acelerando o processo biotecnológico que ocorre através de reações de oxi-redução.

A patente (CHOI, 2014), concedida de número KR101276660B1, possui 4 citações e relata o tratamento de águas residuais orgânicas ao mesmo tempo em que metais preciosos e metais pesados podem ser recuperados. Na presente invenção, ocorre a geração de elétrons no anodo através da biodegradação dos compostos orgânicos. Os elétrons gerados no anodo migram para o catodo através de um circuito externo, onde reagem com os aceitadores de elétrons (íons metálicos), gerando assim uma corrente elétrica no sistema. Ao mesmo tempo, íons e prótons cruzam a membrana para que seja alcançada a neutralidade da carga. É importante para a geração de energia no sistema, que o potencial elétrico do catodo seja maior do que o potencial gerado pela reação microbiana de NAD^+/NADH no anodo. Maior será a

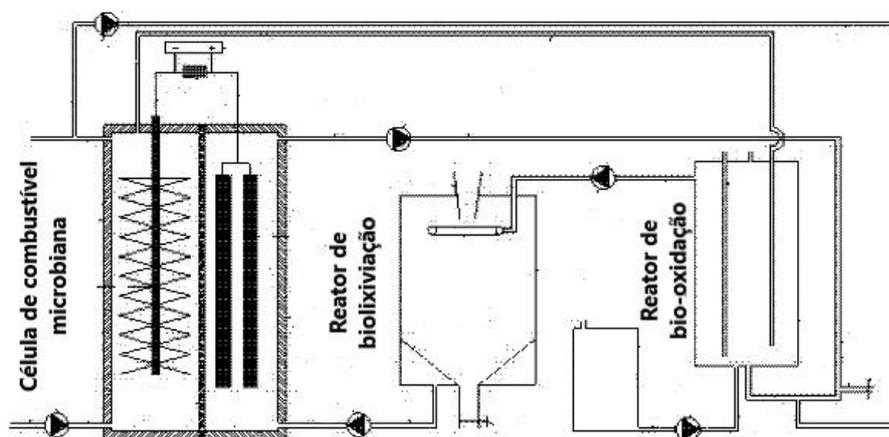
geração de energia na célula combustível microbiana, quanto maior for o potencial elétrico padrão dos íons metálicos receptores de elétron.

No documento (6 citações) de patente concedida (NIU et al., 2015) de número CN104607443B, foi apresentada uma biolixiviação que ocorreu em um reator de membrana de modo a interceptar e enriquecer a cepa de lixiviação, aumentando a biomassa e melhorando a atividade catalítica, o que permite uma redução no tempo de processamento, que é uma das principais desvantagens da lixiviação biológica em relação à lixiviação química. Outra invenção, com 6 citações, descreve na patente de número CN100404705C (ZHENG, 2006) um processo de recuperação híbrida, onde ocorre a biolixiviação de cobre através da reação do metal com íons férricos produzidos por ação microbiana através da oxidação de íons ferrosos, seguida pela deposição eletrolítica do metal lixiviado (eletrometalurgia).

A patente concedida de número CN104328283B (GU et al., 2015), que possui 7 citações, relata a biolixiviação de cobre por ação de bactérias termofílicas moderadas, em processo que ocorre à 45 °C, com posterior separação da solução lixiviada e da cepa de lixiviação através de filtração por membrana de fibra oca, possibilitando a reutilização dos microrganismos na etapa de lixiviação. Já o documento concedido com 8 citações e de número CN104785212B (HUO et al., 2015) apresenta um método de modificação de resíduos de biomassa com tioureia, gerando um bioissorvente com alta seletividade na bioexatção do ouro proveniente de REEE.

A patente mais citada (10 citações), de número CN103397195B concedida (JIANG; LI; ZHANG, 2013), descreve a utilização conjunta de duas técnicas biometalúrgicas. São elas a biolixiviação e a recuperação bioeletroquímica, onde a Figura 17 ajuda na visualização do sistema.

Figura 18 - Processo de utilização conjunta de técnicas de biolixiviação e recuperação bioeletroquímica de metais presentes em REEE



Fonte: Adaptado de (JIANG; LI; ZHANG, 2013)

Na imagem acima é possível ver que o processo possui uma célula de combustível microbiana, um reator de bio-oxidação e um reator de biolixiviação interconectados entre si. No reator de bio-oxidação ocorre o processo de oxidação do Fe^{2+} em Fe^{3+} através de reação microbiana. A solução contendo Fe^{3+} é direcionada para o reator de biolixiviação, onde o Fe^{3+} irá oxidar o cobre metálico presente em REEE triturado que é adicionado no reator, que também conta com a presença de microrganismos capazes de transformar parte dos íons Fe^{2+} em Fe^{3+} novamente, de modo a melhorar a eficiência da etapa de biolixiviação. Em seguida, a solução contendo o cobre lixiviado e íons Fe^{2+} vai para o catodo da célula de combustível microbiana. No catodo, ocorre a recuperação do cobre lixiviado em solução, que se deposita no eletrodo, enquanto que a solução contendo Fe^{2+} é redirecionada para a alimentação do reator de bio-oxidação, onde os íons Fe^{2+} serão novamente oxidados a Fe^{3+} pelos microrganismos. No anodo da célula combustível microbiana ocorre a biodegradação de compostos orgânicos, que podem ser amido, esgoto doméstico, águas residuais de processamento de alimentos entre outros resíduos orgânicos. A utilização conjunta destas técnicas permite uma biolixiviação mais eficiente e, além da recuperação de cobre presente em REEE, o método ainda trata efluentes orgânicos e também é capaz de gerar energia elétrica.

Além destes documentos mais citados, é importante mencionar a invenção no documento de propriedade intelectual publicado (CASASANTA, 2015) com número WO2015137922A1, que descreve o processo para confecção de placas de circuito impresso com material polimérico biodegradável e possibilitaria futuramente uma nova técnica de recuperação biológica dos metais presentes nos resíduos eletrônicos. A presente invenção oferece uma nova concepção de placas de circuito impresso, que foram projetadas pensando no momento de seu descarte, onde o material metálico pode ser recuperado com biodegradação do polímero presente na placa. Este método de recuperação só poderia ser aplicado no futuro, quando estas placas de fato entrassem no mercado e os respectivos eletrônicos que conteriam estas placas fossem descartados.

5. Conclusão

A partir da análise de patentes, foi possível realizar uma análise do cenário atual e de algumas tendências tecnológicas no campo da biometalurgia aplicada à recuperação de metais de interesse, preciosos ou críticos, que estão presentes em resíduos de equipamentos eletroeletrônicos. Apesar de algumas limitações na busca de patentes como, por exemplo, limitações da plataforma de pesquisa, necessidade da utilização de palavras-chave mais abrangentes para encontrar um maior número de documentos, entre outros, foi possível obter resultados, que possibilitaram a discussão de algumas informações interessantes.

Observou-se um aumento do interesse na inovação de técnicas biometalúrgicas para a recuperação de metais presentes em REEE na década atual, o que se deve, provavelmente, a adoção em 2010 do programa de Construção de Base de Demonstração de Mineração Urbana, por parte da China, que obtém um notório protagonismo em relação às outras nações, na direção do desenvolvimento tecnológico em biometalurgia para a recuperação de metais presentes em REEE, tendo em vista que o país é o maior consumidor do mundo de recursos e vê como necessário uma gestão otimizada dos mesmos. O empenho empregado pela China com este programa certamente é o principal fator que explica o aumento do interesse neste tipo de tecnologia na presente década, tendo em vista que a China foi responsável pela publicação de 56% das patentes encontradas neste trabalho. Além disso, houve uma constatação por parte da União Europeia da necessidade de desenvolver meios de recuperar recursos contendo matérias-primas críticas, que são de fundamental importância para atender às futuras demandas econômicas, tendo em vista que muitos metais críticos presentes em REEE são necessários para a produção de equipamentos de alta tecnologia. Provavelmente isso também contribuiu para alavancar a publicação de patentes no período de 2011 até 2019.

Houve um destaque das instituições acadêmicas e de pesquisa referente número de depósitos de documentos de prioridade em relação ao setor privado, refletindo o estágio inicial de desenvolvimento tecnológico deste setor, pois foram depositados 18 documentos de prioridade por universidades, 2 por pesquisadores e 1 por instituto de pesquisa. Isso também pôde ser confirmado com o número de 34

famílias de patentes encontradas e que estavam de acordo o escopo do presente trabalho.

Entretanto, como destaque é possível citar empresas especializadas na recuperação de metais utilizando biotecnologia, como a Mint Innovation da Nova Zelândia e a BRAIN AG da Alemanha, além de empresa Americana que redefiniu o *design* de placas de circuito impresso, produzindo componentes eletrônicos biodegradáveis. Isso demonstra que o mercado se movimenta na direção de criar soluções através de inovação para uma gestão mais adequada dos recursos constituintes de equipamentos eletrônicos, principalmente pelo valor contido nestes equipamentos.

Na verificação dos principais símbolos da classificação internacional de patentes (IPC), foram identificados os grupos de maior ocorrência entre as patentes encontradas, fornecendo algumas informações sobre determinados grupos de metais que aparecem mais nos documentos através de sua recuperação, além da constatação do grande número de invenções que possibilita tanto a recuperação de metais valiosos, como o tratamento de metais pesados.

Durante a leitura dos documentos de patente, foi possível observar tendências no desenvolvimento de técnicas diversas para melhorar a eficiência de processos biolixiviação de metais presentes em REEE, além do tratamento conjunto de resíduos eletrônicos e efluentes contendo compostos orgânicos com o método de recuperação bioeletroquímica, onde ainda ocorre a geração de energia elétrica. Ainda foi possível verificar que as técnicas de biolixiviação e biossorção possuem uma maior aplicação dentre invenções patenteadas até o momento, em relação às demais técnicas biometalúrgicas. Observou-se também a aplicação híbrida da biometalurgia, com mais de uma técnica biometalúrgica.

O desenvolvimento da engenharia genética, assim como o redesenho de produtos e serviços baseado no conceito de economia circular, são fatores que também podem interferir no futuro do desenvolvimento tecnológico do campo da biometalurgia para uma recuperação mais sustentável de recursos minerais presentes em REEE como metais críticos e valiosos. O avanço em técnicas de engenharia genética poderia aumentar a eficiência de processos biológicos envolvidos na

recuperação de metais e o redesenho de equipamentos eletroeletrônicos poderia possibilitar novas formas de recuperação com custo reduzido, além de processamento tecnológico mais simples. Isso só poderá ser alcançado com a realização de pesquisas na área, que ainda poderiam possibilitar o conhecimento de mecanismos biológicos ainda desconhecidos, tendo em vista que as técnicas de biometalurgia ainda estão em seu estágio inicial no ciclo de vida tecnológico.

Referências Bibliográficas

ABDELBASIR, S. M. et al. Status of electronic waste recycling techniques: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 17, p. 16533–16547, 1 jun. 2018.

ABDI. **Logística reversa de equipamentos eletroeletrônicos**. Brasília: Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 2013.

ABDUL KHALIQ et al. Metal Extraction Processes for Electronic Waste and Existing Industrial Routes: A Review and Australian Perspective. **Resources**, v. 3, n. 1, p. 152–179, 2014.

AWASTHI, A. K.; LI, J. An overview of the potential of eco-friendly hybrid strategy for metal recycling from WEEE. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 126, p. 228–239, 1 nov. 2017.

BAI, J. et al. **Method for improving microbial leaching of metal copper in waste circuit board through graphene modified carbon cloth electrode system**, CN105886775A, 24 ago. 2016.

Baldé, C.P., Forti V., Gray, V., Kuehr, R., Stegmann, P. : The Global E-waste Monitor – 2017, United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna.

BINNEMANS, K. et al. Recycling of rare earths: a critical review. **Journal of Cleaner Production**, v. 51, p. 1–22, 15 jul. 2013.

BORSCHIVER, S.; DA SILVA, A. L. R. **TECHNOLOGY ROADMAP: Planejamento Estratégico para alinhar Mercado-Produto-Tecnologia**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2016.

BRAIN. **BioXtractor**. Disponível em: <<https://www.brain-biotech.com/bioextractor>>. Acesso em: 30 dez. 2019.

BRAIN AG. **BRAIN AG website**. Disponível em: <<https://www.brain-biotech.com/brain-ag>>. Acesso em: 30 dez. 2019.

CASASANTA, I. V. **Biodegradable Printed Circuit Boards**, WO2015137922A1, 17 set. 2015.

CHAUHAN, R.; UPADHYAY, K. Removal of heavy metal from E-Waste: A review. **International Journal of Chemical Studies**, v. 3, n. 3, p. 15–21, 1 out. 2015.

CHINESE ACADEMY OF SCIENCES. **Chinese Academy of Sciences website**. Disponível em: <http://english.cas.cn/about_us/introduction/201501/t20150114_135284.shtml>. Acesso em: 2 jan. 2020.

CHOI, C. **Method for Heavy Metal Elimination or Precious Metal Recovery Using Microbial Fuel Cell**, KR101276660B1, 27 mar. 2014.

CUI, J.; ZHANG, L. Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 158, n. 2, p. 228–256, 30 out. 2008.

DAIM, T. U. et al. Forecasting emerging technologies: Use of bibliometrics and patent analysis. **Technological Forecasting and Social Change**, Tech Mining: Exploiting Science and Technology Information Resources. v. 73, n. 8, p. 981–1012, 1 out. 2006.

DEPLANCHE, K.; MACASKIE, L. E. Biorecovery of gold by *Escherichia coli* and *Desulfovibrio desulfuricans*. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 99, n. 5, p. 1055–1064, 2008.

EPO. **Espacenet – patent search**. Disponível em: <<https://worldwide.espacenet.com/patent/>>. Acesso em: 14 dez. 2019.

ESPACENET. **Espacenet - pocket guide**. Disponível em: <[http://documents.epo.org/projects/babylon/eponet.nsf/0/8C12F50E07515DBEC12581B00050BFDA/\\$File/espacenet-pocket-guide_en.pdf](http://documents.epo.org/projects/babylon/eponet.nsf/0/8C12F50E07515DBEC12581B00050BFDA/$File/espacenet-pocket-guide_en.pdf)>. Acesso em: 10 dez. 2019.

EUROPEAN COMMISSION. **Critical raw materials for the EU**: Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. Brussels: European Commission, 2010.

GEISSDOERFER, M. et al. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 757–768, 1 fev. 2017.

GERBASE, A. E.; OLIVEIRA, C. R. DE. Reciclagem do lixo de informática: uma oportunidade para a química. **Química Nova**, v. 35, n. 7, p. 1486–1492, 2012.

GU, G. et al. **Method for extracting copper in waste printed circuit boards by virtue of moderately thermophilic bacteria**, CN104328283B, 4 fev. 2015.

HAN, W. et al. **Recycling method of waste printed circuit board**, CN106947866A, 14 jul. 2017.

HU, Y.; POUSTIE, M. Urban mining demonstration bases in China: A new approach to the reclamation of resources. **Waste Management**, v. 79, p. 689–699, 1 set. 2018.

HUO, F. et al. **Biomass adsorbent, and preparation method and applications thereof**, CN104785212B, 22 jul. 2015.

ILYAS, S.; LEE, J. Biometallurgical Recovery of Metals from Waste Electrical and Electronic Equipment: a Review. **ChemBioEng Reviews**, v. 1, n. 4, p. 148–169, 2014.

IŞILDAR, A. et al. Two-step bioleaching of copper and gold from discarded printed circuit boards (PCB). **Waste Management, WEEE: Booming for Sustainable Recycling**. v. 57, p. 149–157, 1 nov. 2016.

IŞILDAR, A. et al. Biotechnological strategies for the recovery of valuable and critical raw materials from waste electrical and electronic equipment (WEEE) – A review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 362, p. 467–481, jan. 2019.

JIANG, H.; LI, X.; ZHANG, J. **Recovery device and recovery method of metallic copper of waste printed circuit board**, CN103397195B, 20 nov. 2013.

KADUKOVÁ, J.; VIRČÍKOVÁ, E. Comparison of differences between copper bioaccumulation and biosorption. **Environment International**, Recent Advances in Bioremediation. v. 31, n. 2, p. 227–232, 1 fev. 2005.

KUEHR, R. The Step Initiative 2014. **Solving the E-waste Problem (Step) White Paper: One Global Definition of E-waste**, 3 jun. 2014.

KURODA, K.; UEDA, M. Molecular design of the microbial cell surface toward the recovery of metal ions. **Current Opinion in Biotechnology**, Energy biotechnology – Environmental biotechnology. v. 22, n. 3, p. 427–433, 1 jun. 2011.

MASSARI, S.; RUBERTI, M. Rare earth elements as critical raw materials: Focus on international markets and future strategies. **Resources Policy**, v. 38, n. 1, p. 36–43, 1 mar. 2013.

MCBETH, P. **Start-up Cleantech Mint Innovation levanta US \$ 5,2 milhões**. Disponível em: <<https://www.scoop.co.nz/stories/BU1812/S00299/cleantech-start-up-mint-innovation-raises-52m.htm>>. Acesso em: 16 jan. 2020.

MICHALAK, I.; CHOJNACKA, K.; WITEK-KROWIAK, A. State of the Art for the Biosorption Process—a Review. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 170, n. 6, p. 1389–1416, 1 jul. 2013.

MINT INNOVATION. **Mint Innovation website**. Disponível em: <<https://www.mint.bio>>. Acesso em: 30 dez. 2019.

MINT INNOVATION LINKEDIN. **Mint Innovation: LinkedIn**. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/company/mintinnovation/about/>>. Acesso em: 30 dez. 2019.

NANCHARAI, Y. V.; MOHAN, S. V.; LENS, P. N. L. Biological and Bioelectrochemical Recovery of Critical and Scarce Metals. **Trends in Biotechnology**, v. 34, n. 2, p. 137–155, 1 fev. 2016.

NICOLAY, X.; VAUCHEL, K. **Method for Bioleaching a Metal Present in a Material**, EP3008220B1, 19 maio 2016.

NIU, Z. et al. **Method for treating solid wastes by culturing biological leachate by use of membrane bioreactor**, CN104607443B, 13 maio 2015.

OECD. **Manual de Oslo: Diretrizes para a Coleta e Interpretação de dados sobre Inovação Tecnológica**. OCDE, Eurostat e Financiadora de Estudos e Projetos, p. 184, 1997.

OKWU, P. I.; ONYEJE, I. N. Extraction of Valuable Substances from E-Waste. **American Journal of Engineering Research**, p. 6, 2014.

ONGONDO, F. O.; WILLIAMS, I. D.; WHITLOCK, G. Distinct Urban Mines: Exploiting secondary resources in unique anthropogenic spaces. **Waste Management**, Urban Mining. v. 45, p. 4–9, 1 nov. 2015.

PARANHOS, R. D. C. S.; RIBEIRO, N. M. IMPORTÂNCIA DA PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA EM BASE EM PATENTES E SEUS OBJETIVOS DA BUSCA. **Cadernos de Prospecção**, v. 11, n. 5, p. 1274, 2018.

RIBEIRO, N. M. **Série Prospecção Tecnológica**. Salvador: IFBA, FORTEC, 2018. v. 1

ROTARU, A.-E. et al. Non-enzymatic palladium recovery on microbial and synthetic surfaces. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 109, n. 8, p. 1889–1897, 2012.

SANTOS, M. DE M. et al. Prospecção de tecnologias de futuro: métodos, técnicas e abordagens. **Parcerias Estratégicas**, v. 9, n. 19, p. 189-230–230, 2004.

TESFAYE, F. et al. Improving urban mining practices for optimal recovery of resources from e-waste. **Minerals Engineering**, v. 111, p. 209–221, 1 set. 2017.

TSYDENOVA, O.; BENGTSSON, M. Chemical hazards associated with treatment of waste electrical and electronic equipment. **Waste Management**, v. 31, n. 1, p. 45–58, 1 jan. 2011.

UNIÃO EUROPEIA. 32002L0096. Diretiva 2002/96/CE do Parlamento Europeu e do Conselho relativa aos resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos (REEE). Jornal Oficial da União Europeia. 13 fev. 2003, p. 24–38.

UNIÃO EUROPEIA. 32012L0019. Diretiva 2012/19/EU do Parlamento Europeu e do Conselho relativa aos resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos (REEE). Jornal Oficial da União Europeia. 4 jul. 2012, p. 38–71.

UNIVERSIDADE POLITÉCNICA DE XANGAI. **Visão geral da Universidade Politécnica de Xangai**. Disponível em: <<http://en.sspu.edu.cn/about/briefntrodu/42548.htm>>. Acesso em: 3 jan. 2020.

WANG, M. et al. Recovery of rare and precious metals from urban mines—A review. **Frontiers of Environmental Science & Engineering**, v. 11, n. 5, p. 1, 8 jul. 2017.

WEEE CENTER UNIVERSIDADE POLITÉCNICA DE XANGAI. **Shanghai Collaborative Innovation Centre for WEEE Recycling**. Disponível em: <<http://en.sspu.edu.cn/research/weee/52427.htm>>. Acesso em: 4 jan. 2020.

WIPO. **About the International Patent Classification**. Disponível em: <<https://www.wipo.int/classifications/ipc/en/preface.html>>. Acesso em: 30 dez. 2019.

XAVIER, L. H. Mineração Urbana de resíduos eletroeletrônicos: uma nova fronteira a explorar no Brasil. **Brasil Mineral**, n. 379, mar. 2018.

XAVIER, L. H. et al. Sustainability and the circular economy: A theoretical approach focused on e-waste urban mining. **Resources Policy**, p. 101467, 23 ago. 2019.

ZENG, X.; LI, J.; LIU, L. Solving spent lithium-ion battery problems in China: Opportunities and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 1759–1767, dez. 2015.

ZENG, X.; MATHEWS, J. A.; LI, J. Urban Mining of E-Waste is Becoming More Cost-Effective Than Virgin Mining. **Environmental Science & Technology**, v. 52, n. 8, p. 4835–4841, 17 abr. 2018.

ZHENG, Z. Z. **Method for extracting metal copper using microbe and its use**, CN100404705C, 8 nov. 2006.