

O USO DE ROTAS HIDROMETALÚRGICAS PARA A RECUPERAÇÃO DE TERRAS RARAS DE FONTES SECUNDÁRIAS

RESUMO: *Os elementos de terras raras são utilizados em várias áreas devido às suas propriedades únicas, desempenhando um papel crucial no avanço de novas tecnologias. No entanto, devido ao controle chinês sobre a produção e refino, bem como às restrições de fornecimento, esses elementos se tornaram cada vez mais escassos. A busca por novas fontes, incluindo a reciclagem, é destacada como uma maneira de garantir o abastecimento e promover a economia circular, ao mesmo tempo em que se reduzem os impactos ambientais.*

Neste estudo, são discutidos processos de recuperação por meio da extração e purificação de REEs de fontes secundárias, visando encontrar rotas e fontes alternativas à mineração, com o objetivo de minimizar a geração de resíduos e o consumo de energia. A recuperação e reciclagem de REEs representam uma oportunidade a ser explorada, fornecendo perspectivas para um futuro sustentável através do reaproveitamento de resíduos e da promoção da economia circular.

PALAVRAS-CHAVE: TERRAS RARAS, ECONOMIA CIRCULAR, ROTAS HIDROMETALÚRGICAS

UTILIZATION OF HYDROMETALLURGICAL ROUTES FOR THE RECOVERY OF RARE EARTHS FROM SECONDARY SOURCES

ABSTRACT: *Rare earth elements are utilized in various industries for their unique properties, playing a crucial role in the advancement of new technologies. However, due to Chinese control over production and refining, as well as supply restrictions, these elements have become increasingly scarce. The search for new sources, including recycling, is emphasized as a way to ensure supply and promote a circular economy, while reducing environmental impacts.*

In this study, processes for recovery through extraction and purification of REEs from secondary sources are discussed, aiming to find alternative routes and sources to mining, with the objective of minimizing waste generation and energy consumption. The recovery and recycling of REEs represent an opportunity to be explored, providing prospects for a sustainable future through the reuse of waste and promotion of the circular economy.

KEYWORDS: RARE EARTHS, CIRCULAR ECONOMY, HYDROMETALLURGICAL ROUTES

1. INTRODUÇÃO

Os elementos de terras raras (REE) possuem uma grande importância na transição global em direção à sustentabilidade e à redução de carbono, através do avanço da energia limpa e da eletrificação (Arya *et al.*, 2023a; Botelho Junior *et al.*, 2023). Em 2020, a fabricação de ímãs permanentes empregados em turbinas eólicas e motores elétricos correspondeu a cerca de 30% do consumo global de Terras Raras (Gielen *et al.*, 2022).

Devido à imprescindibilidade da manutenção de tecnologias e à escassez de substitutos imediatos, os materiais são tidos como críticos. Este fato ressalta a crucial importância dos Metais de Terras Raras (REE) para a economia e a iminente necessidade de novas fontes e recursos destes metais (Venkatesan *et al.*, 2018).

Resíduos provenientes de equipamentos eletrônicos, tais como lâmpadas de LED, fones de ouvido, dispositivos móveis, discos rígidos (HDD) e baterias recarregáveis, constituem fontes secundárias de REE (Huy *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2013). Estes resíduos exibem níveis mais elevados de elementos de terras raras em comparação com os minerais, o que os torna uma opção promissora para a recuperação desses elementos (Sagrillo Pimassoni *et al.*, 2023b).

As estratégias de extração de metais de resíduos eletrônicos são diferenciadas em termos de técnicas pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas, sendo frequentemente combinadas para maximizar a eficácia (Bian *et al.*, 2022; Jha *et al.*, 2016b; Ma, 2019). Comparativamente aos processos pirometalúrgicos, as rotas hidrometalúrgicas se destacam por suas vantagens, uma vez que são capazes de operar em temperatura ambiente, o que contribui para a diminuição da emissão de substâncias prejudiciais e possibilita a obtenção de metais mais puros. Estas vias incluem etapas de extração através de técnicas de lixiviação ácida ou alcalina, bem como de purificação por meio de procedimentos como precipitação, extração por solventes, troca iônica e uso de membranas (Böddeker, 2018; Flett, 2005; Han, 2020).

Com isso em mente, o presente artigo tem como propósito analisar as estratégias de reciclagem e economia circular com o intuito de fomentar a segurança no abastecimento de REE, reduzir os efeitos ambientais da mineração e colaborar para a transição sustentável rumo a uma economia de baixo carbono. A meta deste estudo consistiu em realizar uma revisão da literatura pertinente à obtenção de REE provenientes de fontes secundárias.

1.1. Objetivo

O objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão bibliográfica sobre as terras raras proveniente de fontes secundárias e como ocorre a sua recuperação através de processos hidrometalúrgicos, como lixiviação, extração por solventes e troca iônica.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Os elementos de terras raras (REETs) constituem um conjunto de 17 elementos, sendo o termo "terras raras" originalmente associado aos elementos lantanídeos da linha 3 da tabela periódica, no entanto, também abrangendo todos estes elementos em si. Os REEs consistem em lantânio (La), cério (Ce), praseodímio (Pr), neodímio (Nd), promécio (Pm), samário (Sm), európio (Eu), gadolínio (Gd), térbio (Tb), disprósio (Dy), hólmio (Ho), érbio (Er), túlio (Tm), itérbio (Yb) e lutécio (Lu), além de ítrio (Y) e escândio (Sc) (Adeel *et al.*, 2019b; Swain; Mishra, 2019).

Os Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos são valorizados por conta de suas características de estabilidade química e magnética. Eles são empregados na fabricação de catalisadores, dispositivos eletroeletrônicos, ímãs, instrumentos para iluminação, produtos aeroespaciais, vidros especiais, cristais utilizados em tecnologia laser, materiais cerâmicos supercondutores, ligas metálicas com propriedades mecânicas e equipamentos eletrônicos (Sagrillo Pimassoni *et al.*, 2023a). Em 2018, 60% dos REEs utilizados na fabricação de catalisadores, 15% na produção de vidros, 10% em aplicações metalúrgicas e ligas, e 5% em outros usos não especificados (Gambogi, 2022).

Atualmente, a China detém técnicas necessárias para a purificação e desenvolvimento de tecnologias que utilizam os REEs. Com isso, exerce um controle sobre os recursos e reservas de minerais e desde 2010 impôs restrições à exportação desses recursos com o objetivo de assegurar o suprimento interno (Depraite and Goutte, 2023).

De acordo com o Ministério da Indústria e Tecnologia da Informação da China (MIIT), estima-se que a produção global de REEs atingirá aproximadamente 350.000 toneladas em 2024. Em 2023, a produção foi de 240.000 toneladas e em 2022, de 210.000 toneladas (Geological survey, 2023; Geological Survey, 2024). Até 2050, Sagrillo Pimassoni *et al.* (2023b) estimam que a produção atingirá 120 milhões de toneladas por ano.

A mineração urbana abrange a extração de matérias-primas de fontes secundárias por meio de processos biológicos, químicos ou físicos. Essa abordagem expande a mineração em aterros para recuperar compostos e elementos de fontes como resíduos de construção, resíduos industriais, produtos eletroeletrônicos e outras fontes, incluindo construção civil e esgoto sanitário. O tratamento apropriado desses resíduos contribui para manter a economia circular ativa (Botelho Junior *et al.*, 2023; Pierron *et al.*, 2017; Xavier; Ottoni; Abreu, 2023).

A reciclagem destes materiais objetiva não apenas a reutilização dos metais presentes em sua composição, mas também a mitigação da poluição ambiental. Alguns resíduos antigos, como aparelhos de televisão antigos, incluíam metais potencialmente perigosos para a saúde, como chumbo, mercúrio e cádmio. Foram implementadas várias estratégias para recuperar recursos de

Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos de maneira sustentável, com o intuito de quebrar o ciclo da economia linear (Liu *et al.*, 2023; Ramanayaka; Keerthanan; Vithanage, 2020).

A reciclagem de materiais eletrônicos é frequentemente comparada a minas urbanas devido à alta concentração de metais presente nos resíduos, superando muitas vezes a quantidade encontrada em minérios in natura (München; Veit, 2017). Esses materiais devem passar por processos hidrometalúrgicos para reutilização desses elementos críticos, o que também representa uma opção sustentável para mitigar os impactos ambientais e maximizar o reaproveitamento desses recursos (Jha *et al.*, 2016a). O Global E-waste monitor em 2020 calculou que em 2019 foram geradas 53,6 milhões de toneladas de Resíduos Eletroeletrônicos, prevendo-se um aumento para 74 milhões de toneladas em 2030 (Forti *et al.*, 2020).

A mineração dos REEs apresenta consequências ambientais, uma vez que tem potencial de liberar substâncias tóxicas e radioativas. Além disso, os rejeitos resultantes dessa etapa são armazenados em barragens, o que pode levar a colapsos, perda de áreas funcionais e exposição de pessoas e comunidades a possíveis acidentes relacionados a essas estruturas (Jha *et al.*, 2016a).

Os REEs foram incluídos na lista dos materiais críticos pelos EUA, União Europeia e pela Austrália (Australian Government, 2023; European Commission, 2023; Gunn, 2014; Nguyen; Lee, 2016). Essa classificação foi atribuída devido aos riscos de abastecimento e a ausência de substitutos em suas aplicações. Desde então, observou-se aumentos nos preços desses minerais (Adeel *et al.*, 2019c).

A reciclagem desses resíduos visa a reutilização dos metais contidos e, consequentemente, a redução da poluição ambiental. Os e-wastes como painéis fotovoltaicos, telas de LCD, lâmpadas de LED, smartphones e ímãs permanentes de discos rígidos contêm REEs em sua composição (Arya *et al.*, 2023b; Kim *et al.*, 2011; Ramanayaka; Keerthanan; Vithanage, 2020). Segundo München and Veit (2017), os e-waste apresentam maiores concentrações de metais que os minérios.

Os ímãs permanentes de terras raras são compostos por aproximadamente 30% de REEs, como Nd, Pr e Dy (Chen; Jian; Lee, 2022; Önal *et al.*, 2015). Os ímãs permanentes de REEs, atualmente fabricados, são compostos de Nd, ferro e boro ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$), além disso incluem Dy e Co, para aumentar a estabilidade em temperatura de até 312°C, Pr, para reduzir os custos de produção (Stein; Kasper; Veit, 2022). Os ímãs são aplicados em unidades de disco rígido de computadores, telefones celulares, telefones celulares, autofalantes e veículos híbridos e elétricos (Xiao *et al.*, 2022; Zhang; Zhao, 2016).

Os ímãs NdFeB presentes nos dispositivos eletrônicos representam uma fonte secundária de Nd, apresentando concentrações desse metal superiores ao encontrados nos minérios. Dentre os dispositivos obsoletos, os discos rígidos recebem destaque devido a disponibilidade associada a mudança dos dispositivos de armazenamento para SSD. O Nd recuperado dos ímãs pode ser utilizado

na produção de novos produtos e direcionado para outras finalidades, como em lasers e como catalisador (Meng *et al.*, 2013; Parveen *et al.*, 2022).

Segundo a União Europeia (2020), até 2030, estima-se que a demanda de Nd, Pr e Dy para produção de ímãs permanentes aplicados em turbinas eólicas e motores será de 200.000 milhões de toneladas e de 1.200.000 milhões de toneladas até 2050.

Para complementar a demanda e buscar uma alternativa as restrições chinesas, o reuso (uso direto) torna-se uma técnica economicamente viável e sustentável para a reaproveitamento de ímãs por não gerar resíduos ou requererem uso de reagentes químicos e não (Binnemans *et al.*, 2013). No entanto, essa abordagem apenas se aplica a ímãs de grande porte, como motores elétricos e turbinas eólicas, visto que os discos rígidos de computadores são limitados devido à segurança dos dados e às políticas que exigem a destruição do dispositivo mencionado (Handwerker *et al.*, 2018).

Dentre os dispositivos obsoletos, os HDDs recebem destaque devido a disponibilidade associada a mudança dos dispositivos de armazenamento para SSDs. O Nd recuperado dos ímãs pode ser utilizado na produção de novos ímãs ou outras finalidades, como em lasers e como catalisador (Meng *et al.*, 2013; Parveen *et al.*, 2022).

Os LEDs são dispositivos semicondutores projetados para produzir luz. A implementação de dispositivos de LED pode resultar na diminuição do consumo de eletricidade e na redução de emissões de gases, contribuindo assim para a substituição de outras fontes de iluminação pela tecnologia LED ((Oliveira; Benvenuti; Espinosa, 2021). Y, Eu e Tb são exemplos de REEs utilizados na fabricação desses dispositivos (Oliveira *et al.*, 2022). Em 2012, 40-60% de Y, 70% de Eu e 40-60% de Tb foram utilizados na produção de LEDs (Ku; Setlur; Loudis, 2015).

Os LEDs constituem cerca de 0,9 Mt de resíduos eletrônicos gerados em 2019. Prevê-se que, até 2030, a quantidade total de resíduos de lâmpadas atinja 74,7 Mt (Adrian *et al.*, 2020). Com isso, é importante salientar que isso pode levar a um acúmulo e desperdício desse tipo de resíduo tecnológico. No entanto, a coleta insuficiente (ou inexistente) desses materiais no final de sua vida útil, dificulta a viabilização de um processamento industrial (Oliveira; Benvenuti; Espinosa, 2021).

Por meio das metodologias disponíveis para a extração de metais proveniente dos LEDs, calcula-se que apenas 55% desses metais são recuperados utilizando procedimentos tradicionais (Pilotto *et al.*, 2020).

Existe uma falta nos índices atuais de reciclagem de resíduos, de modo que investigações de novas rotas, se fazem imprescindíveis para o desenvolvimento de métodos realmente eficazes de reciclagem para lâmpadas de LED (Pilotto *et al.*, 2020). Diante desse cenário, a reciclagem torna-se essencial, para evitar o acúmulo de resíduos perigosos, a exaustão dos recursos naturais, impactos ambientais negativos (Tian *et al.*, 2022).

2.1. Lixiviação e técnicas de purificação

A lixiviação é um procedimento complexo que consiste na extração de metais por meio da interação entre um agente lixiviante e o material sólido. A extração dos metais pode ser realizada através da utilização de diferentes reagentes, tais como substâncias alcalinas e ácidos inorgânicos e orgânicos. (Niu *et al.*, 2022).

Amato et al. (2019) investigaram a extração de elementos de terras raras de lâmpadas fluorescentes através da utilização de ácido sulfúrico. Durante os testes realizados à 50 °C por 2 horas, com uma relação Sólido: Líquido de 1:15 e concentração de 2 mol/L, o resíduo foi submetido a um tratamento prévio a 950°C por uma hora, resultando na extração de 90% de itérbio, 90% de európio, 65% de térbio, 45% de cério, 45% de gadolínio e 30% de lantânio.

Amato et al. (2019) estudaram a lixiviação de REEs de lâmpadas fluorescentes utilizando H₂SO₄. Durante os ensaios a 50 °C por 2h, relação Sólido: Líquido 1:15 e 2 mol/L, o resíduo recebeu um pré-tratamento a 950°C por uma hora, com isso foram extraídos 90% de Y, 90% de Eu, 65% de Tb, 45% de Ce, 45% de Gd e 30% de La.

Os Vidros ópticos utilizados em computadores, máquinas apresentam a composição de 43,1% de La₂O₃, 4,6% de Gd₂O₃ E 3,3% de Nb₂O₅. Após passarem por etapas de lixiviação com ácido clorídrico 6M, durante 4 horas a 90°C e 30 minutos, foi possível remover 94,5% de La e 96,8% de Gd. O autor não forneceu os dados de recuperação do Nd(JIANG *et al.*, 2005).

A troca iônica é um processo de purificação de soluções amplamente utilizado na recuperação de metais. Neste método, a solução em fase móvel interage com a resina em fase estacionária. A técnica de troca iônica emprega um substrato sólido, frequentemente constituído de resina polimérica, carregada positiva (catiônica) ou negativamente (aniônica), os quais são passíveis de substituição pelos íons presentes na solução(Zhang & Matsumoto, 2023).

Nishihama et al. (2013) realizaram um estudo de troca iônica em um licor de lixiviação de HNO₃ contendo La e Ce. Foram utilizadas resinas (Diaion HP2MG (éster metacrílico sem grupo funcional)) imersa em uma solução PC88A (monoéster 2-etilhexílico de ácido fosfônico 2-etilhexílico). Após as condições otimizadas, foram adsorvidos 39% para La e 43,3% para Ce.

Yamada et al. (2018) também avaliaram a resina Diaion HP2MG impregnada com PC88A, no entanto, para a separação do Nd de um licor de H₂SO₄ 0,1mol/L. Através do método desenvolvido, foram adsorção de 45% para Nd e 96,4% para Dy. Através dos resultados de Yamada et al. (2018) foi possível observar que a aplicação de resina impregnada em PC88A apresentou-se como uma metodologia viável para a separação de HREEs e LREEs.

A extração por solvente (SX) é um método de separação líquido-líquido que consiste na complexação de metais contidos na solução aquosa por meio da interação com um solvente orgânico.

A fase orgânica é constituída por um agente extrator e um diluente, utilizado para diminuir a viscosidade do extratante (Santanilla *et al.*, 2021).

A extração e separação de neodímio de outros elementos de terras raras utilizando Aliquat 336. A concentração ideal do agente extrator foi determinada em 0,6 mol. Após etapas de reextração com ácido nítrico diluído, obteve-se uma recuperação de 95% de neodímio(YOON *et al.*, 2016).

Yoon et al. (2016) estudaram os extratantes Cyanex 272 e Aliquat 336 para a separação de Fe e REEs (Nd, Pr and Dy). Nos ensaios com Cyanex 272, a 25°C, relação A/O 1/5 durante 15 min, foram extraídos 90% de Fe e Dy e 65% de Nd e Pr. O Nd foi separado dos demais REEs utilizando o Aliquat 336 0,6 mol/L. Após etapas de reextração com HNO₃ 6 mol/L, obteve-se uma recuperação de 95% de neodímio.

Deshmane et al. (2020) estudaram a extração utilizando membranas para separação de REEs usando TODGA e TBP. Para ambos extratantes foram recuperados 95% dos REEs (Ce, Sm, Nd e Tb), mas após os processos de purificação ainda apresentou uma impureza residual de Cu (1,72%).

Os solventes orgânicos ainda podem ser associados a membranas. Uma membrana é caracterizada por uma fina película contendo poros ou camadas minúsculas, que desempenha o papel de uma barreira seletiva entre duas fases, sejam líquidas, gasosas ou de vapor. As membranas podem ser constituídas por material sólido, líquido ou gel (Couper *et al.*, 2010).

Investigar soluções para a recuperação de terras raras é crucial diante da escassez desses elementos, que gera uma dependência de países que controlam sua extração, produção e tecnologia. Esses metais desempenham um papel fundamental em diversos setores da indústria, como a fabricação de dispositivos eletrônicos, veículos elétricos, ímãs, turbinas eólicas, equipamentos médicos, iluminação e outros (Adeel et al., 2019b; Lucas et al., 2015f).

A extração de elementos de terras raras pode acarretar diversos impactos ambientais, o que reforça a necessidade de explorar novas estratégias para a recuperação desses elementos a fim de promover práticas sustentáveis. O desenvolvimento de novas abordagens para a recuperação de terras raras a partir de fontes secundárias é essencial para impulsionar a economia circular. É crucial incentivar a inovação, segurança e resiliência na gestão de resíduos, implementando métodos para a recuperação de elementos de terras raras de fontes secundárias, gerenciando as fontes primárias e disseminando técnicas para reduzir o monopólio (Botelho et al., 2023b; Kinnunen et al., 2022b).

3. CONCLUSÕES

Os elementos de terras raras (REE) desempenham um papel crucial no avanço de novas tecnologias relacionadas à descarbonização e à geração de energia renovável. A escassez desses elementos pode resultar em riscos de abastecimento e dificultar a transição para uma economia mais sustentável. Alternativas à mineração de REE estão sendo exploradas com o objetivo de reduzir a dependência do suprimento chinês, como a extração de fontes secundárias. A reciclagem de resíduos, especialmente aqueles provenientes de indústrias e eletrônicos, emerge como uma estratégia valiosa para o reaproveitamento e a minimização de subprodutos.

Rotas hidrometalúrgicas para a extração de REE de fontes secundárias ganham destaque por seu potencial de sustentabilidade, ao demandarem menor consumo energético e reduzirem as emissões de gases em comparação com rotas pirometalúrgicas. O ácido sulfúrico e o ácido clorídrico são frequentemente citados na literatura como agentes lixiviante na extração de REE. Já técnicas de extração por solventes são usadas na purificação dos licores, com extrantes como Cyanex 273, Cyanex 923, TBP e D2EHPA demonstrando eficácia na separação das impurezas. Outras técnicas, como resina de troca iônica e precipitação, também são empregadas na purificação, embora em menor escala se comparadas à extração por solventes. A separação por membranas, apesar de reduzir a quantidade de reagente necessário e aumentar a seletividade, ainda enfrenta desafios relacionados ao custo e manutenção. Apesar do progresso nos processos de recuperação de REE a partir de fontes secundárias, é evidente a necessidade contínua de pesquisa e refinamento das técnicas empregadas.

REFERÊNCIAS

- ADEEL, Muhammad *et al.* Cryptic footprints of rare earth elements on natural resources and living organisms. **Environment International**, [s. l.], v. 127, n. January, p. 785–800, 2019a.
- ADEEL, Muhammad *et al.* **Cryptic footprints of rare earth elements on natural resources and living organisms**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2019b.
- ADEEL, Muhammad *et al.* **Cryptic footprints of rare earth elements on natural resources and living organisms**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2019c.
- ADRIAN, Contributions S *et al.* **The Global E-waste Monitor 2020**. [S. l.: s. n.], 2020.
- AMATO, A. *et al.* Sustainability analysis of innovative technologies for the rare earth elements recovery. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 106, p. 41–53, 2019.
- ARYA, Shashi *et al.* **A global glance on waste electrical and electronic equipments (WEEEs)**. [S. l.]: INC, 2023a. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-323-99919-9.00018-0>.
- ARYA, Shashi *et al.* **A global glance on waste electrical and electronic equipments (WEEEs)**. [S. l.]: INC, 2023b.
- AUSTRALIAN GOVERNMENT. **Critical Minerals at Geoscience Australia**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.ga.gov.au/scientific-topics/minerals/critical-minerals>. Acesso em: 4 jun. 2023.
- BIAN, Yu-Yang *et al.* Recovery of rare earth elements from permanent magnet scraps by pyrometallurgical process. **Rare Metals**, [s. l.], v. 41, n. 5, p. 1697–1702, 2022.
- BINNEMANS, Koen *et al.* **Recycling of rare earths: A critical review**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2013.
- BÖDDEKER, Karl W. **Liquid Separations with Membranes**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018.
- BOTELHO JUNIOR, Amilton Barbosa *et al.* The sustainable development goals, urban mining, and the circular economy. **Extractive Industries and Society**, [s. l.], v. 16, n. November 2022, 2023.
- CHEN, Wei Sheng; JIAN, Guo Cai; LEE, Cheng Han. Recovery and Separation of Dysprosium from Waste Neodymium Magnets through Cyphos IL 104 Extraction. **Materials**, [s. l.], v. 15, n. 15, 2022.
- COUPER, James R. *et al.* MEMBRANE SEPARATIONS. **Chemical Process Equipment (Revised Second Edition)**, [s. l.], p. 663–690, 2010.
- DEPRAITER, Lisa; GOUTTE, Stéphane. **The role and challenges of Rare Earths in the Energy Transition**. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: <https://shs.hal.science/halshs-04199796>.
- DESHMANE, Vishwanath G; ISLAM, Syed Z; BHAVE, Ramesh R. Selective Recovery of Rare Earth Elements from a Wide Range of. **Environmental science & technology**, [s. l.], v. 54, p. 550–558, 2020.

DOLF GIELEN, BY *et al.* **Critical materials for the energy transition: Rare earth elements.** [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: www.irena.org.

EUROPEAN COMMISSION. Study on the Critical Raw Materials for the EU. [s. l.], 2023. Disponível em: <http://www.europa.eu>.

FLETT, Douglas S. Solvent extraction in hydrometallurgy: The role of organophosphorus extractants. In: , 2005. **Journal of Organometallic Chemistry.** [S. l.: s. n.], 2005. p. 2426–2438.

FORTI, Vanessa *et al.* **The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, Flows, and Resources.** [S. l.: s. n.], 2020.

GAMBOGI, Joseph. 2018 Minerals Yearbook RARE EARTHS [ADVANCE RELEASE]. **Usgs**, [s. l.], n. August, p. 60.1-69.7, 2022.

GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral Commodity Summaries 2023.** [S. l.: s. n.], 2023.

GEOLOGICAL SURVEY, Us. **Mineral Commodity Summaries 2024.** [S. l.: s. n.], 2024.

GUNN, Gus. **Critical Metals Handbook.** [S. l.: s. n.], 2014. Disponível em: www.wiley.com/wiley-blackwell.

HAN, Kenneth N. Characteristics of precipitation of rare earth elements with various precipitants. **Minerals**, [s. l.], v. 10, n. 2, 2020.

HANDWERKER, Carol A *et al.* **APPLICATION OF THE OSTROM FRAMEWORK TO SUPPORT A CIRCULAR ECONOMY FOR USED ELECTRONICS.** [S. l.: s. n.], 2018. Disponível em: https://community.inemi.org/value_recovery.

HUY, Pham Khanh *et al.* **Recovering rare earth oxide from NdFeB magnet of waste HDDs by leaching and selective precipitation methods** **Vietnam Journal of Science and Technology.** [S. l.: s. n.], 2017.

JHA, Manis Kumar *et al.* Review on hydrometallurgical recovery of rare earth metals. **Hydrometallurgy**, [s. l.], v. 161, p. 77–101, 2016a.

JHA, Manis Kumar *et al.* Review on hydrometallurgical recovery of rare earth metals. **Hydrometallurgy**, [s. l.], v. 165, p. 2–26, 2016b.

KIM, Eun Young *et al.* Selective recovery of gold from waste mobile phone PCBs by hydrometallurgical process. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 198, p. 206–215, 2011.

KINNUNEN, Päivi *et al.* A review of circular economy strategies for mine tailings. **Cleaner Engineering and Technology**, [s. l.], v. 8, n. April, 2022.

KU, Anthony Y.; SETLUR, Anant A.; LOUDIS, Johnathan. Impact of Light Emitting Diode Adoption on Rare Earth Element Use in Lighting: Implications for Yttrium, Europium, and Terbium Demand. **The Electrochemical Society Interface**, [s. l.], 2015.

LI, Li *et al.* Recovery of metals from spent lithium-ion batteries with organic acids as leaching reagents and environmental assessment. **Journal of Power Sources**, [s. l.], v. 233, p. 180–189, 2013.

LUCAS, Jacques *et al.* Rare Earths Purification, Separation, Precipitation and Calcination. *In: RARE EARTHS*. [S. l.]: Elsevier, 2015. p. 69–91.

MA, En. Recovery of waste printed circuit boards through pyrometallurgy. *In: ELECTRONIC WASTE MANAGEMENT AND TREATMENT TECHNOLOGY*. [S. l.]: Elsevier, 2019. p. 247–267.

MENG, Jian *et al.* Corrosion performance of magnesium (Mg) alloys containing rare-earth (RE) elements. *In: CORROSION PREVENTION OF MAGNESIUM ALLOYS: A VOLUME IN WOODHEAD PUBLISHING SERIES IN METALS AND SURFACE ENGINEERING*. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2013. p. 38–60.

MÜNCHEN, Daniel Dotto; VEIT, Hugo Marcelo. **Neodymium as the main feature of permanent magnets from hard disk drives (HDDs)**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2017.

NGUYEN, Thi Hong; LEE, Man Seung. **A review on the separation of molybdenum, tungsten, and vanadium from leach liquors of diverse resources by solvent extraction**. [S. l.]: Taylor and Francis Ltd., 2016.

NISHIHAMA, Syouhei; KOHATA, Kanako; YOSHIZUKA, Kazuharu. Separation of lanthanum and cerium using a coated solvent-impregnated resin. **Separation and Purification Technology**, [s. l.], v. 118, p. 511–518, 2013.

NIU, Dapeng *et al.* Optimization control of hydrometallurgical leaching process based on. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 176, n. 3, p. 107341, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107341>.

OLIVEIRA, Rafael Piumatti De *et al.* Characterization of end-of-life LEDs : Mapping critical , valuable and hazardous elements in different devices. [s. l.], v. 151, n. April, p. 113–122, 2022.

OLIVEIRA, R P De; BENVENUTI, J; ESPINOSA, D C R. A review of the current progress in recycling technologies for gallium and rare earth elements from light-emitting diodes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 145, n. March, p. 111090, 2021.

ÖNAL, Mehmet Ali Recai *et al.* Recycling of NdFeB Magnets Using Sulfation, Selective Roasting, and Water Leaching. **Journal of Sustainable Metallurgy**, [s. l.], v. 1, n. 3, p. 199–215, 2015.

PARVEEN, Shagufta *et al.* Comparison of Nd: YAG (Neodymium-Doped Yttrium Aluminum Garnet) Laser Posterior Capsulotomy Techniques in The Treatment of Posterior Capsular Opacification. **Pakistan Armed Forces Medical Journal**, [s. l.], v. 72, n. 1, p. 164–168, 2022.

PILOTTO, Marcelo *et al.* Assessment of LED lamps components and materials for a recycling perspective. **Waste Management**, [s. l.], v. 107, p. 285–293, 2020.

RAMANAYAKA, Sammani; KEERTHANAN, Santhirasekaram; VITHANAGE, Meththika. **Urban mining of E-waste: Treasure hunting for precious nanometals**. [S. l.]: INC, 2020.

SAGRILLO PIMASSONI, Yasmim *et al.* The recovery of rare earth elements from waste electrical and electronic equipment: A review. **Hydrometallurgy**, [s. l.], v. 222, n. August, p. 106156, 2023a.

SAGRILLO PIMASSONI, Yasmim *et al.* **The recovery of rare earth elements from waste electrical and electronic equipment: A review.** [S. l.]: Elsevier B.V., 2023b.

SANTANILLA, Adriana Johanny *et al.* Structure investigation for nickel and cobalt complexes formed during solvent extraction with the extractants Cyanex 272 , Versatic 10 and their mixtures. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 160, p. 106691, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106691>.

STEIN, Ronei Tiago; KASPER, Angela Cristina; VEIT, Hugo Marcelo. Recovery of Rare Earth Elements Present in Mobile Phone Magnets with the Use of Organic Acids. **Minerals**, [s. l.], v. 12, n. 6, p. 668, 2022.

SWAIN, Nilam; MISHRA, Sujata. A review on the recovery and separation of rare earths and transition metals from secondary resources. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 220, p. 884–898, 2019.

TIAN, Xi *et al.* Waste LEDs in China : Generation estimation and potential recycling benefits. **Resources, Conservation & Recycling**, [s. l.], v. 187, n. May, p. 106640, 2022.

VENKATESAN, Prakash *et al.* Selective Extraction of Rare-Earth Elements from NdFeB Magnets by a Roomtemperature Electrolysis Pretreatment Step. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, [s. l.], v. 6, n. 7, p. 9375–9382, 2018.

XIAO, Shijiang *et al.* Behind of the criticality for rare earth elements: Surplus of China’s yttrium. **Resources Policy**, [s. l.], v. 76, 2022.

YAMADA, Emi *et al.* Separation and Purification Technology Separation process of dysprosium and neodymium from waste neodymium magnet. **Separation and Purification Technology**, [s. l.], v. 192, n. June 2017, p. 62–68, 2018.

YOON, Ho-sung *et al.* Solvent extraction , separation and recovery of dysprosium (Dy) and neodymium (Nd) from aqueous solutions : Waste recycling strategies for permanent magnet processing. **Hydrometallurgy**, [s. l.], v. 165, p. 27–43, 2016.

ZHANG, Shaoling; MATSUMOTO, Hidetoshi. **Electrospun ion-exchange membranes.** [S. l.]: Elsevier Inc., 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-823032-9.00018-0>.

ZHANG, Jack; ZHAO, Baodong. **Separation Hydrometallurgy of Rare Earth Elements.** [S. l.: s. n.], 2016.