

# Reciclagem de metais de terras raras: métodos de extração e reutilização em dispositivos eletrônicos

DOI: 10.5281/zenodo.14768637

Bárbara Emília Ribeiro Alcântara <sup>a\*</sup>

The increasing production and consumption of electronic devices have intensified e-waste generation, characterized by complex compositions that include rare earth elements (REEs). These elements play a critical role in sectors such as electronics, renewable energy, and high-performance technologies, but their primary extraction faces economic, environmental, and geopolitical challenges. This article reviews major methods for REE extraction and reuse, with a focus on recent innovations, such as the selective extraction-evaporation-electrolysis (SEEE) process.

O aumento da produção e do consumo de dispositivos eletrônicos tem intensificado a geração de resíduos eletrônicos, que possuem composição complexa e incluem elementos de terras raras (REEs). Esses elementos desempenham um papel crucial em setores como eletrônica, energia renovável e tecnologias de alta performance, mas sua extração primária enfrenta desafios econômicos, ambientais e geopolíticos. Este artigo revisa os principais métodos de extração e reutilização de REEs, com ênfase em inovações recentes, como o processo de extração-evaporação-eletrolise seletiva (SEEE).

<sup>a</sup>Universidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

\*E-mail: barbaraemiliaalcantara@gmail.com

**Palavras-chave:** terras raras; reciclagem; lixo eletrônico; pilhas.

Recebido em 27 de dezembro de 2024,

Aprovado em 15 de janeiro de 2025,

Publicado em 31 de janeiro de 2025.

## Introdução

O aumento expressivo na produção e consumo de dispositivos eletrônicos tem intensificado a geração de resíduos eletrônicos, um fluxo de lixo que cresce significativamente mais rápido que outros tipos de resíduos sólidos. Globalmente, a produção desse tipo de lixo atingiu níveis alarmantes, projetando-se 50 milhões de toneladas anuais em 2019, com perspectivas de aumento contínuo. Esses resíduos possuem uma composição complexa, incluindo metais preciosos e críticos, como os elementos de terras raras (REEs), que desempenham um papel fundamental na fabricação de componentes eletrônicos, turbinas eólicas, veículos elétricos e sistemas de iluminação.<sup>1</sup>

Os elementos de terras raras (REEs, do inglês *Rare Earth Elements*) são um conjunto de 17 elementos químicos que incluem os lantanídeos (La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) e os metais ítrio (Y) e escândio (Sc). Apesar do nome, esses elementos não são necessariamente raros na crosta terrestre, mas geralmente estão dispersos, o que torna sua extração e separação complexas e economicamente desafiadoras. Sua designação como "terras raras" deve-se à dificuldade histórica em isolá-los, combinada com sua ocorrência frequente em minerais misturados.<sup>2,3</sup>

Os REEs são comumente classificados em dois grupos principais: os elementos de terras raras leves (LREEs) e os elementos de terras raras pesados (HREEs). Os LREEs incluem os elementos com números atômicos entre 57 (lantânio) e 63 (európio). Esses são mais abundantes e amplamente empregados em catalisadores e ímãs permanentes. Já os HREEs, que compreendem os elementos com números atômicos entre 64 (gadolínia) e 71 (lutécio), além do ítrio e do escândio, são menos abundantes, possuem propriedades únicas e encontram aplicações mais específicas, como em lasers e materiais avançados para geração de energia renovável.<sup>4</sup>

Esses elementos desempenham um papel essencial em diversos setores industriais devido às suas propriedades ópticas, magnéticas, catalíticas e elétricas singulares. Um dos principais usos está na fabricação de ímãs permanentes de alto desempenho, onde o neodímio (Nd) e o praseodímio (Pr) se destacam. Esses ímãs são utilizados em turbinas eólicas, motores elétricos, discos rígidos e equipamentos médicos, como ressonância magnética. Outro exemplo é o emprego do tório (Tb) e do európio (Eu) na iluminação moderna, incluindo lâmpadas fluorescentes e LEDs, onde suas propriedades luminescentes permitem a produção de luz branca de alta qualidade.<sup>2,3,5</sup>

Na indústria automotiva e química, o cério (Ce) é amplamente usado como catalisador, essencial para o refino de

petróleo e o controle de emissões de poluentes. Já o érbio (Er) e o itérbio (Yb) são fundamentais na amplificação de sinais em fibras ópticas, possibilitando a transmissão de dados em alta velocidade nas telecomunicações. No campo da defesa, elementos como o gadolínio (Gd) e o disprósio (Dy) são utilizados em tecnologias estratégicas, como sistemas de radar, sensores e armamentos avançados. Ademais, os REEs também são indispensáveis na eletrônica de consumo, onde compõem telas de smartphones, TVs e monitores, proporcionando ajuste de cor e brilho. Além disso, desempenham um papel crucial no desenvolvimento de tecnologias verdes, como células solares e baterias recarregáveis, que apoiam a transição global para fontes de energia renováveis.<sup>1,4</sup>

**Figura 1.** Imã de Neodímio. Extraído da referência 15.



Portanto, é notável que tais componentes são essenciais para o avanço tecnológico e industrial. No entanto, sua extração primária é caracterizada por desafios ambientais significativos, altos custos de produção e uma cadeia de suprimentos altamente concentrada em poucos países, como a China, que domina mais de 80% da produção global. Essa dependência geopolítica, combinada com o aumento da demanda global, pressiona as reservas limitadas desses recursos não renováveis, o que eleva seus preços e traz à tona a urgência de estratégias alternativas de abastecimento.<sup>2,6</sup>

Desse modo, a reciclagem surge como uma solução promissora para mitigar os impactos ambientais e econômicos da mineração e processamento de REEs, ao mesmo tempo em que reduz a dependência de novas extrações. Métodos como pirometalurgia, hidrometalurgia e abordagens bio-hidrometalúrgicas estão sendo explorados para recuperar esses metais de dispositivos eletrônicos descartados. Embora essas tecnologias apresentem desafios, como alto consumo de energia e produção de resíduos, avanços recentes têm focado

em tornar os processos mais eficientes e ambientalmente sustentáveis.<sup>7</sup>

A recuperação de REEs a partir de dispositivos eletrônicos em fim de vida também apresenta vantagens estratégicas significativas, incluindo a redução da pressão sobre aterros sanitários, a diminuição da contaminação ambiental e o reaproveitamento de materiais críticos presentes em baterias, ímãs de neodímio e displays eletrônicos. Contudo, a complexidade dos resíduos eletrônicos e os custos associados à reciclagem demandam pesquisas contínuas para superar limitações tecnológicas e promover soluções economicamente viáveis.<sup>8</sup>

Este artigo explora os principais métodos de extração e reutilização de REEs presentes em dispositivos eletrônicos, abordando tanto as tecnologias convencionais quanto as inovações recentes no campo. Além disso, discute os desafios e perspectivas associados à transição para uma economia circular que maximize o reaproveitamento de recursos críticos, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e a segurança da cadeia de suprimentos global.

## Metodologia

A metodologia utilizada pelo texto de referência<sup>5</sup> foi um processo inovador denominado extração-evaporação-eletrólise seletiva (SEEE), desenvolvido para separar e recuperar elementos de terras raras (REEs) de sucatas de ímãs de neodímio (Nd). A metodologia é composta por três etapas principais: extração seletiva, evaporação seletiva e eletrólise seletiva. Esse método visa recuperar metais de alta pureza de maneira eficiente, reduzindo a dependência de recursos naturais e os riscos associados à cadeia global de suprimentos.

Na etapa de extração seletiva, os elementos REEs são extraídos de sucatas de ímãs comerciais resistentes ao calor utilizando sais fundidos à base de  $\text{CaCl}_2$ . Adiciona-se  $\text{CaF}_2$  e  $\text{MgCl}_2$  à mistura para otimizar o processo, garantindo a extração completa dos elementos e evitando a evaporação de haletos de terras raras durante o aquecimento. O procedimento ocorre em altas temperaturas (1123 K por 20 horas), seguidas de um aquecimento adicional (1273 K por 3 horas) sob vácuo para remover subprodutos, como  $\text{MgCl}_2$  e magnésio não reagido. Após o resfriamento, o material resultante é separado para análise e caracterização.

Na etapa de evaporação seletiva, os subprodutos são removidos, e as amostras são analisadas utilizando técnicas como Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia de Emissão Atômica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-AES) e Difração de Raios X (XRD). Esses métodos confirmam a composição e pureza dos REEs extraídos e garantem a eficiência do processo.

Por fim, na etapa de eletrólise seletiva, os elementos Nd e Dy são separados eletroquimicamente em um sistema de sais fundidos preparado previamente. Essa etapa utiliza um eletrodo de níquel e condições controladas para maximizar a separação seletiva dos metais. Experimentos foram conduzidos com Nd e Dy para simplificar o processo e obter alta eficiência na recuperação desses metais críticos, excluindo outros REEs com propriedades químicas semelhantes, como o praseodímio (Pr).

Quanto à escrita dessa resenha, foram utilizadas as plataformas *ScienceDirect* e *Google Scholar* para a busca do artigo de referência e de artigos complementares ao tema em questão.

## Resultados e discussão

O processo SEEE demonstrou ser eficiente na recuperação seletiva de elementos de terras raras (REEs) a partir de sucatas de ímãs de neodímio (Nd), apresentando resultados promissores em todas as suas etapas principais: extração, evaporação e eletrólise. Durante a etapa de extração, os elementos Nd, Dy e Pr foram isolados com altas taxas de eficiência, superiores a 98%, utilizando sais fundidos de CaCl<sub>2</sub> com pequenas adições de MgCl<sub>2</sub> e CaF<sub>2</sub>. Este último desempenhou um papel crucial na redução das pressões de vapor dos compostos REE, diminuindo perdas por evaporação e garantindo maior pureza do material extraído.

A análise dos ímãs Nd após a extração indicou a remoção quase completa dos REEs, enquanto as concentrações residuais de Nd e Pr foram inferiores a 0,1%. A microscopia eletrônica de varredura (SEM) e a difração de raios X (XRD) confirmaram a eficácia do processo, evidenciando alterações estruturais e redução significativa da fase rica em REEs no material tratado.

Na etapa de separação por eletrólise, os elementos Nd e Dy foram separados com alta precisão utilizando um eletrodo de níquel. A liga formada apresentou uma razão Dy:Nd de até 42, superando amplamente a proporção inicial nos ímãs

tratados. As condições de eletrólise otimizadas permitiram alcançar taxas de formação de liga superiores a 65 μm·h<sup>-1</sup> e fatores de enriquecimento que atenderam aos requisitos para a fabricação de ímãs Nd de alta performance.

As taxas de recuperação calculadas para os metais Dy e Nd foram de 91% e 96%, respectivamente. A pureza dos produtos finais também foi elevada, com o Dy recuperado apresentando uma pureza superior a 90%, enquanto o Nd apresentou pureza de 95%. Esses resultados atendem aos padrões exigidos para a reutilização dos REEs na produção de novos ímãs e outros dispositivos tecnológicos, demonstrando a viabilidade do processo SEEE como uma solução sustentável para o reaproveitamento de sucatas magnéticas.

Além disso, o processo SEEE foi projetado para maximizar a reutilização de materiais. O sal fundido residual e os subprodutos de Mg evaporados foram regenerados e reutilizados nas etapas subsequentes, reduzindo desperdícios e aumentando a eficiência geral do sistema. Com uma eficiência de corrente superior a 85% e alta taxa de recuperação dos metais críticos, o processo proposto apresenta potencial significativo para a aplicação em escala industrial, contribuindo para a sustentabilidade da cadeia de suprimentos global de REEs.

## Conclusões

A reciclagem de elementos de terras raras (REEs) apresenta-se como uma solução indispensável para enfrentar os desafios globais de sustentabilidade, dependência geopolítica e demanda crescente por recursos não renováveis. Neste contexto, o processo SEEE destacou-se como uma abordagem inovadora, eficaz e sustentável para recuperar metais críticos de sucatas de ímãs de neodímio, com elevadas taxas de eficiência e pureza nos produtos finais.

Os resultados demonstraram que, utilizando sais fundidos otimizados e técnicas de extração, evaporação e eletrólise seletiva, é possível isolar Nd, Dy e Pr com eficiência superior a 98%, garantindo alta qualidade e adequação dos metais recuperados para aplicação em novas tecnologias. A regeneração de subprodutos e o reaproveitamento de materiais no processo reforçam o compromisso com a sustentabilidade, reduzindo desperdícios e impactos ambientais associados à reciclagem de REEs.

Além disso, as elevadas taxas de recuperação de Dy e Nd, aliadas à precisão no controle das ligas formadas, atendem

às exigências industriais para a produção de ímãs de alto desempenho e outros dispositivos tecnológicos. Esses avanços posicionam o processo SEEE como uma alternativa viável à mineração tradicional, contribuindo para a economia circular e promovendo a segurança da cadeia de suprimentos global.

Nesse sentido, a ampla gama de aplicações dos elementos terras raras reflete a importância estratégica desses e destaca a necessidade de investir em métodos sustentáveis para sua extração e reciclagem, contribuindo para um futuro tecnologicamente avançado e ambientalmente consciente.

Em suma, os avanços tecnológicos e a implementação de métodos como o SEEE são essenciais para enfrentar os desafios ambientais e econômicos impostos pela crescente demanda por elementos de terras raras. Este estudo reforça a importância de iniciativas que integrem inovação, sustentabilidade e eficiência para promover um futuro mais sustentável e menos dependente da exploração de recursos primários.

## Contribuições por Autor

O artigo e a inclusão de algumas observações são de Bárbara Emília Ribeiro Alcântara.

## Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

## Agradecimentos

Agradeço ao PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) por todo o apoio concedido através do Programa de Educação Tutorial. Agradeço também ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

## Notas e referências

- 1 P. R. Behera, R. Farzana and V. Sahajwalla, Production of NiFe alloy by combined recycling of waste nickel-metal hydride batteries and waste toner powder, *Sustainable Materials and Technologies*, 2024, **42**, e01175.
- 2 J. Chen, S. Sun, G. Tu and F. Xiao, Review of efficient recycling and resource utilization for rare

earth molten salt electrolytic slag, *Minerals Engineering*, 2023, **204**, 108425.

- 3 S. S. V. Vuppaldadiyam, B. S. Thomas, C. Kundu, A. K. Vuppaldadiyam, H. Duan and S. Bhattacharya, Can e-waste recycling provide a solution to the scarcity of rare earth metals? An overview of e-waste recycling methods, *Science of The Total Environment*, 2024, **924**, 171453.
- 4 M. Danouche, A. Bounaga, A. Oulkhir, R. Boulef, Y. Zeroual, R. Benhida and K. Lyamlouli, Advances in bio/chemical approaches for sustainable recycling and recovery of rare earth elements from secondary resources, *Science of The Total Environment*, 2024, **912**, 168811.
- 5 H. Hua, K. Yasuda, Y. Norikawa and T. Nohira, Highly Efficient and Precise Rare-Earth Elements Separation and Recycling Process in Molten Salt, *Engineering*, DOI:10.1016/j.eng.2022.12.013.
- 6 D. Crocce Romano Espinosa, A. Moura Bernardes and J. Alberto Soares Tenório, Brazilian policy on battery disposal and its practical effects on battery recycling, *Journal of Power Sources*, 2004, **137**, 134–139.
- 7 Y. Wu, H. Hu, Y. Gu, Q. Zhang and Q. Yuan, Comprehensive impact assessment on resource and environment of emerging recycling technologies for waste materials: Evidence from waste rare earth phosphors recycling, *Resources, Conservation and Recycling*, 2024, **209**, 107799.
- 8 L. Zhang, P. Jiang, Y. Zhang, Y. V. Fan and Y. Geng, Recycling impacts of renewable energy generation-related rare earth resources: A SWOT-based strategical analysis, *Energy*, 2024, **312**, 133624.
- 9 L. M. Boasquevisque, A. A. L. Marins, E. J. B. Muri, M. F. F. Lelis, M. A. Machado and M. B. J. G. Freitas, Synthesis and evaluation of electrochemical and photocatalytic properties of rare Earth, Ni and Co mixed oxides recycled from spent Ni-MH battery

- 10 C. G. Mothé and M. I. B. Tavares, Study of recycling and biodegradability of ethylene-*co*-vinyl acetate reject by thermal analysis, *Polymer Degradation and Stability*, 1997, **57**, 183–186.
- 11 V. L. Borra, A. Jena, N. S. Sistla, P. Venkatesan, M. A. R. Önal and C. R. Borra, Synergetic recycling of permanent magnet and Li-ion battery cathode material for metals recovery, *Sustainable Materials and Technologies*, 2024, **41**, e01043.
- 12 LAREX - Laboratório de Reciclagem, Tratamento de Resíduos e Extração, <https://larex.poli.usp.br/recuperacao-de-metais-terras-raras-de-disco-rígidos-obsoletos>. Acesso em 26 de dezembro de 2024.
- 13 V. E. D. O. D. Santos, V. G. Celante, M. D. F. F. Lelis and M. B. J. G. D. Freitas, Método hidrometalúrgico para reciclagem de metais terras raras, cobalto, níquel, ferro e manganês de eletrodos negativos de baterias exauridas de Ni-MH de telefone celular, *Quím. Nova*, 2014, **37**, 22–26.
- 14 A. E. Gerbase and C. R. D. Oliveira, Reciclagem do lixo de informática: uma oportunidade para a química, *Quím. Nova*, 2012, **35**, 1486–1492.
- 15 Imã de Neodímio Disco 10mm x 3mm, <https://www.imadeneodimio.com/186k8cjlw-ima-de-neodimio-disco-10mm-x-3mm-100-peças>, (accessed 27 December 2024).
- 16 M. M. Cardoso, G. A. S. Paz, N. G. C. Brito, V. M. Pinto, E. A. A. Júnior, Abordagem sobre reciclagem de elementos terras raras em sucata eletrônica, Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, 2016.