

Seção Business and Innovation da Revista PhysicsWorld

Energizando a economia verde: a questão dos ímãs sem terras raras

10 outubro de 2023 – James McKenzie

Tradução livre: Carmen Greice Renda

Os elementos terras raras são vitais para ímãs encontrados em carros elétricos, turbinas eólicas e outras partes da “economia verde”. Mas com as incertezas sobre o fornecimento dessas matérias, James McKenzie relata a importância de ímãs que evitem completamente o uso de terras raras.



Figura 1 – Hora de escavar – com problemas geopolíticos envolvendo a mineração de elementos terras raras, a escolha é pelos ímãs permanentes que podem ser materiais alternativos (cortesia: Shutterstock/mykhailo pavlenko)

Os ímãs podem não ser algo que a maioria das pessoas pensam, mas eles são essenciais para a crescente “economia verde”, que está no centro dos motores de veículos elétricos e geradores em turbinas eólicas. A demanda está crescendo, particularmente por poderosos ímãs permanentes feitos de ligas de elementos “terras-raras”. Mas com a incerteza sobre o fornecimento contínuo das terras raras, a busca é por ímãs alternativos que funcionem tão bem mas sejam feitos completamente de outros elementos.

No caso de ter esquecido a química, os elementos terras-raras consistem dos lantanídeos, que estão na parte longa horizontal da tabela periódica, com o ítrio e o escândio que não são lantanídeos e são do grupo 3. Quando se trata de ímãs, os de maior interesse são neodímio, samário e cério, assim como os chamados de terras raras “pesadas” são disprósio, térbio e itérbio. Os ímãs permanentes mais fortes e mais usados, todavia, são ligas de neodímio, ferro e boro (NdFeB) e samário cobalto (SmCo).

1 H Hydrogen																	2 He Helium
3 Li Lithium	4 Be Beryllium											5 B Boron	6 C Carbon	7 N Nitrogen	8 O Oxygen	9 F Fluorine	10 Ne Neon
11 Na Sodium	12 Mg Magnesium											13 Al Aluminum	14 Si Silicon	15 P Phosphorus	16 S Sulfur	17 Cl Chlorine	18 Ar Argon
19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titanium	23 V Vanadium	24 Cr Chromium	25 Mn Manganese	26 Fe Iron	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Copper	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Selenium	35 Br Bromine	36 Kr Krypton
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdenum	43 Tc Technetium	44 Ru Ruthenium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Silver	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Tin	51 Sb Antimony	52 Te Tellurium	53 I Iodine	54 Xe Xenon
55 Cs Cesium	56 Ba Barium	57 La* Lanthanum	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantalum	74 W Tungsten	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platinum	79 Au Gold	80 Hg Mercury	81 Tl Thallium	82 Pb Lead	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium	85 At Astatine	86 Rn Radon
87 Fr Francium	88 Ra Radium	89 Ac** Actinium	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnerium	110 Ds Darmstadtium	111 Rg Roentgenium	112 Cn Copernicium	113 Nh Nihonium	114 Fl Flerovium	115 Mc Moscovium	116 Lv Livermorium	117 Ts Tennessine	118 Og Oganesson
* 58 Ce Cerium																	
59 Pr Praseodymium																	
60 Nd Neodymium																	
61 Pm Promethium																	
62 Sm Samarium																	
63 Eu Europium																	
64 Gd Gadolinium																	
65 Tb Terbium																	
66 Dy Dysprosium																	
67 Ho Holmium																	
68 Er Erbium																	
69 Tm Thulium																	
70 Yb Ytterbium																	
71 Lu Lutetium																	
** 90 Th Thorium																	
91 Pa Protactinium																	
92 U Uranium																	
93 Np Neptunium																	
94 Pu Plutonium																	
95 Am Americium																	
96 Cm Curium																	
97 Bk Berkelium																	
98 Cf Californium																	
99 Es Einsteinium																	
100 Fm Fermium																	
101 Md Mendelevium																	
102 No Nobelium																	
103 Lr Lawrencium																	

Figura 2 – Materiais que importam – Os ímãs permanentes são ligas de elementos terras-raras, que consistem nos lantanídeos (aqueles com massas atômicas entre 57 e 71) além dos escândio e do ítrio no grupo 3 da Tabela Periódica (cortesia: Shutterstock/Peter Hermes Furian)

As terras raras são relativamente abundantes, com mais de 160 minerais conhecidos por contê-las. O Problema é que eles ocorrem em minúsculas concentrações que apenas quatro dos minerais são extraídos de suas terras raras, sendo que os outros são muito caros de recuperar. Bastnäsite é a principal fonte de terras raras – responsável por 94% da oferta – e é a principal fonte mundial de ímãs de neodímio. Argilas lateríticas, por sua vez, são a principal fonte comercial de terras raras pesadas.

Separar e refinar as terras raras é também difícil porque elas são quimicamente muito similares. Também é ambientalmente caro demais, embora isso não tenha impedido que a demanda por ímãs permanentes aumentasse. Um relatório da Magnetics & Materials sugere que até 2030 o mundo precisará de 55.000 toneladas a mais de ímãs de neodímio do que provavelmente estão disponíveis. De fato, o mercado global de ímãs, que estava avaliada em US\$29,3 em 2021, deve crescer quase 6% até 2030, de acordo com uma análise recente de Grand View Research.



Figura 3 – Perseguição mortal – um homem e meninos escavam com pás na República Democrática do Congo, que tem as maiores reservas de cobalto do mundo. A maior parte do cobalto é processada no país por empresas chinesas ou exportada para a China para uso em ímãs permanentes de samário e cobalto (SmCo). As condições dos trabalhadores nas minas têm sido criticadas entre outros, pela Anistia Internacional (cortesia: Julien Harneis / Wikimedia Commons/CC BY-SA 2.0).

A demanda por ímãs de SmCo está crescendo também, apesar dos problemas éticos e ambientais sobre o cobalto que está sendo minerado na República Democrática do Congo, que tem as maiores reservas do mundo do elemento (maioria do samário vem da China). Um novo relatório da Anistia Internacional, por exemplo, diz que a expansão da mineração de cobalto e de cobre no país levou a comunidades serem despejadas à força, com abusos de direitos humanos, “incluindo agressão sexual, incêndios criminosos e espancamentos”.

Muitos dos desafios de encontrar e fazer ímãs de materiais não terras-raras foram discutidas na conferência REPM23 que aconteceu na Universidade de Birmingham no Reino Unido em Setembro. Oficialmente conhecidos como 27th International Workshop on Rare Earth and Future Permanent Magnets and their Applications ou algo como 27º Grupo de Trabalho Internacional sobre Terras raras e Futuros Ímãs Permanentes e suas aplicações, o encontro contou com os grandes e bons da academia e da indústria de todo o mundo. Como eu descobri, há uma grande quantidade de pesquisas e tecnologias empolgantes acontecendo neste campo.

Buscando desempenho

Do ponto de vista da física, a beleza dos ímãs permanentes é que eles armazenam uma grande quantidade de energia, o que permite que pequenos dispositivos com grande eficiência sejam feitos a partir deles. De modo geral, quanto maior o desempenho de um ímã, maior a eficiência do motor. Portanto, mesmo que os ímãs de alto desempenho sejam caros, vale a pena o custo extra porque menos dinheiro precisa ser gasto nas outras partes do sistema que em que eles

são usados. Um motor mais eficiente, por exemplo, significa que a bateria cara em um veículo elétrico não necessita ser tão grande.



Figura 4 – Acima e avante. Na demanda por ímãs permanentes de terras raras poderosos está aumentando em parte porque eles são usados em geradores de turbinas eólicas, que são fonte crescente de “energia verde” (Cortesia: iStock/Oscar Gutierrez Zozulia)

O desempenho geral de um ímã permanente é, portanto, vital, sendo o principal valor de mérito sendo a quantidade de energia que você pode armazenar no material. Conhecido como “produto energético máximo”, ou $BH_{máx}$, é aproximadamente 38 kJ/m^3 para a ferrita (BaFeO), que é o material mais barato em torno de US\$3-6 por quilo. Mas para os ímãs de alto desempenho de neodímio, que custam em torno de US\$ 40-80 por quilo, o $BH_{máx}$ é maior que 410 kJ/m^3 .

Mas um produto ser barato e ter uma alta energia não é tudo. As empresas desenham motores e geradores também querendo ímãs que gerem um alto campo magnético (por exemplo com uma grande “remanência”). Adicionalmente, os ímãs precisam ter uma alta “coercividade”, que é uma medida essencial de quanto de energia é precisa para desmagnetizá-lo. Coercividade depende de como o ímã é feito e quais os aditivos usados para “endurecer o material”. Se a coercividade for muito baixa, o ímã perderá energia, desmagnetizará e inutilizará o motor ou o gerador.

Outro fator vital é a temperatura Curie (T_c), acima da qual o magnetismo é perdido. Ímãs de neodímio tem um T_c relativamente baixa cerca de 210 C° , que é adequado para a maioria das aplicações. Mas a liga cobalto samário tem uma T_c acima de 800 C° , fazendo estes ímãs ótimos para esportes motorizados e outras aplicações onde altas temperaturas são comuns. AlNiCo – uma liga de alumínio, níquel e cobalto – é o único material convencional com T_c superior ao da liga samário cobalto (1000 C°) e com um $BH_{máx}$ melhor do que o da ferrita (a 310 kJ/m^3), mas a sua coercividade é tão baixa que o uso é limitado, especialmente agora que existem ímãs com maior coercividade.

As pessoas na comunidade magnética há muito procuram um ímã que fique na lacuna entre a ferrita e o neodímio em termos de preço e desempenho. Todo mundo adoraria um ímã super barato que superasse o neodímio, mas esses materiais “divinos” não existem atualmente – na verdade, alguns dizem que nunca existirão. Ainda assim, sempre que o preço do neodímio dispara, há um ressurgimento do interesse em novos ímãs. Na verdade, fiquei chocado ao saber, na conferência de Birmingham, quantos potenciais materiais magnéticos estão nesta corrida.

Pelo menos para mim, parece que o desafio não está em fabricar novos materiais em si. O difícil é otimizar o material e o processo de produção, o que pode levar literalmente décadas. Como salientou o cientista japonês Masato Sagawa – o inventor dos ímãs de neodímio – na plenária de abertura do REPM, foram necessários 40 anos de esforços heróicos para que estes materiais atingissem o seu $BH_{\text{máx}}$ atual, que é cerca de 90% do seu valor máximo teórico, e para alcançar alta coercividade e alto desempenho.

Uma questão de escolha

Uma alternativa mais barata ao neodímio é o cério, que é desenterrado e refinado ao mesmo tempo. Poderia parcialmente substituir o neodímio nos ímãs NdFeB, reduzindo custos, mas com uma queda no desempenho. Todavia, há alguns outros tipos promissores de ímãs que são muito menos poluentes e não usam terras raras. Se conseguirmos fazer com que funcione, estaremos realmente transformando metais básicos em “ouro verde” moderno.

Um dos mais promissores e bem respaldados parece ser o nitreto de ferro (FeN). Baseado em apenas dois materiais – ferro e nitrogênio – que são mais baratos e abundantes, tem um $BH_{\text{máx}}$ de 1150 kJ/m^3 e um T_c de $540 \text{ }^\circ\text{C}$. Empresas como a Niron, em Minnesota, EUA, já investem substancialmente na área, empregando grande número de cientistas de materiais para aperfeiçoar as suas propriedades e produção.

Outro concorrente é o manganês-alumínio-carbono (MnAlC), que foi originalmente comercializado na década de 1980, antes de ser abandonado quando os ímãs de neodímio ganharam destaque. Físicos de materiais da Universidade de Sheffield, incluindo Elizabeth Davis-Fowell, mostraram recentemente que o MnAlGa (manganês, alumínio, gálio), que o carbono do MnAlC poderia ser substituído pelo gálio poderia ser ainda melhor.

Então há a tetrataenita – um material magnético encontrado nos meteoritos. Contendo ferro e níquel (FeNi) numa estrutura tetragonal do cristal, é formado na natureza após ter sido resfriado de forma incrivelmente lenta a apenas poucos graus ao longo de milhões de anos. Com um $BH_{\text{máx}}$ teórico de 335 kJ/m^3 , parece promissor especialmente porque o ferro e o níquel são muito baratos. Em 2022, pesquisadores do Reino Unido e da Áustria o fabricaram pela primeira vez aqui na Terra adicionando fósforo (Adv. Sci. 10 2204315). Além do mais, eles produziram a tetraenita em apenas alguns segundos – entre 11 e 15 ordens de magnitude mais rápido do que na natureza. Não está claro que a coercividade poderia ser alcançada e é cedo para este material.

Se você conseguir lidar com uma terra rara mais barata, então o SmFeN, que consiste em samário, ferro e nitrogênio, é um sistema de material comprovado e oferece excelente coercividade. A Nichia – uma empresa japonesa que não deve ser menosprezada – já está buscando esta tecnologia. O samário é muito mais barato e muito menos procurado que o neodímio, por isso pode ser uma boa alternativa.

Futuro atrativo

Quais destes materiais terão sucesso não está claro – e há muitos outros que eu não mencionei. A curto prazo – nos próximos cinco anos ou mais – os ímãs de neodímio continuarão dominando o mercado ao que parece. Na verdade, temos reservas abundantes de elementos terras raras, com grandes depósitos econômicos no Vietnã, na Rússia, na Índia, na Austrália e na Europa.

O problema, porém, é que a China tem uma quota de mercado de 80-90% (o número exato depende de como se olha para a cadeia de abastecimento) e há grandes questões geopolíticas sobre a oferta e o controle. O que aconteceria, por exemplo, se houvessem mais tarifas ou se a venda de produtos contendo ímãs provenientes da China algum dia fosse proibida.



Figura 5 – De propriedade da MP Materials, a mina de terras raras e instalação de processamento Mountain Pass é a única instalação de mineração e processamento de terras raras ativa e em escala nos EUA. O país está atualmente tentando restaurar a sua capacidade de produzir os seus próprios ímãs de terras raras e, portanto, reduzir a sua dependência de fornecimentos provenientes da China e de outros países (Cortesia: Tmy350/Wikimedia CC BY-AS 4.0)

Tais problemas são naturalmente das grandes preocupações para as empresas fabricam motores e geradores, que é uma das razões pelas quais os Estados Unidos tem restaurado as suas capacidades em ímãs de terras raras. A empresa MF em Las Vegas, por exemplo, está construindo uma nova instalação de processamento de materiais com ímãs permanentes na mina Mountain Pass, que fica na Califórnia, perto da fronteira com Nevada. A minha opinião é que se os Estados Unidos conseguirem restaurar totalmente a sua própria produção deste material, as preocupações com a oferta desaparecerão completamente.

No entanto, a longo prazo, as alternativas mais promissoras são as ferritas “duras”, que são ímãs muito mais ecológicos e têm a beleza de estarem disponíveis aqui e agora. Esse, pelo menos, parece ser o consenso das pessoas com quem falei na reunião de Birmingham, com o fabricante

de materiais Proterial (previamente conhecido como Hitachi Metals) tendo pronto construído um protótipo de um motor de magnético de ferrita de 100kW que seria adequado para veículos elétricos.



Figura 6 – futuro livre – Vantagens no desenho de motores por “indução”, que não tem ímãs, podem eliminar inteiramente a necessidade de terras raras. (iStock/ surasak petchang)

Há também uma perspectiva tentadora de que talvez nem precisemos de ímãs para motores. Até recentemente, supunha-se que geralmente os motores magnéticos permanente eram cerca de 10% mais eficientes que os projetos convencionais. Mas, os desenvolvimentos na eletrônica de potência e os avanços na concepção de motores por “indução”, que não precisam de ímãs, têm fechado este buraco. Na verdade, alguns motores a indução estão no mesmo nível daqueles com ímãs permanente e, embora sejam maiores e mais pesados, quem sabe os avanços que nos aguardam.

Ao mesmo tempo, esses mesmos avanços no desenho de motor e eletrônicos significam materiais mais baratos, menos materiais magnéticos potentes podem ser utilizados. Na conferência de Birmingham, todos falavam sobre o último plano diretor publicado no início deste ano pela Tesla Motors, que contemplava a total eliminação das terras raras dos seus futuros motores de ímã permanente. Por enquanto, porém, com a ajuda dos avanços no desenho de motores e geradores, as ferritas duras, eu diria, que são a alternativa mais promissora aos ímãs de terras raras.

No entanto, um mundo totalmente livre de terras raras ainda está muito distante.

Fonte: <https://physicsworld.com/a/powering-the-green-economy-the-quest-for-magnets-without-rare-earths/>