

Imanes permanentes de tierras raras. El nuevo oro negro de los vehículos eléctricos

Permanent magnets of rare earths. The new black gold of electric vehicles



Victoria Abad-San-Martín y Jesús Sagredo-González
EPS de Universidad de Burgos (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8398>

1. INTRODUCCIÓN

En 2020, la UE espera reducir respecto de 1990 sus emisiones de gases de efecto invernadero en al menos un 20%, aumentar la cuota de las energías renovables al menos el 20% del consumo, y lograr un ahorro energético del 20% o superior. Dentro del consumo total de energía, el sector del transporte es una parte importante (alrededor del 30%) y supone aproximadamente el 25% de las emisiones de CO₂ [1].

La necesidad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles en el sector del transporte llevó a considerar alternativas entre las que destacan los vehículos eléctricos (EVs). Tecnológicamente se pueden distinguir tres tipos de vehículos eléctricos: vehículos eléctricos puros o de baterías, vehículos eléctricos de pila de combustible y vehículos eléctricos híbridos (HEV) [2] [3]. Los dos primeros tipos son vehículos puramente eléctricos mientras que los vehículos híbridos combinan motores eléctricos con motores de combustión interna, lo que les confiere más potencia y una mayor autonomía, que es justo el punto débil de los vehículos eléctricos puros.

Un 4% de las ventas actuales de vehículos mundiales corresponde a vehículos híbridos y se estima que será al menos un 15 % en 2020. Así, casi todos los fabricantes de automóviles disponen de un vehículo que utiliza la electricidad como fuente de energía principal o secundaria, siendo el Toyota Prius el líder mundial con cerca de 5.7 millones vendidos en 20 años desde su aparición en 1997 [4].

La evolución de los vehículos híbridos se ha producido gracias a la evolución de los motores eléctricos que incorporan y

estos motores gracias al aumento de la potencia de los imanes. Los imanes conocidos como "NEO" o NdFeB están constituidos por una mezcla de tierras raras (principalmente neodimio), hierro y boro, y fabricados habitualmente mediante sinterización, siendo los únicos imanes con la suficiente energía para sustituir los bobinados del rotor de los motores eléctricos.

Pero el 97% de las tierras raras se encuentra en China, que monopoliza este recurso [5]. La creciente necesidad de este material ha hecho que gobiernos como Estados Unidos y Japón dediquen distintos proyectos propios a subsanar este monopolio. En la actualidad, tiene vital importancia seguir la evolución de estos imanes de tierras raras y las nuevas posibilidades que permitan disminuir su dependencia de minerales críticos.

1. LA IMPORTANCIA DE LAS TIERRAS RARAS

Se conocen mundialmente por Tierras Raras (Rare Earth) RE, o metales especiales, un conjunto de 17 elementos químicos fundamentalmente pertenecientes al grupo de los lantánidos. Estos elementos son insustituibles para la economía mundial, ver Figura 1, por sus características ópticas, eléctricas, magnéticas, catalíticas y luminiscentes. Se requieren para el desarrollo de las tecnologías más modernas como discos duros, aerogeneradores, en los aparatos electrónicos más empleados hoy en día como los teléfonos móviles, las consolas de videojuegos, los navegadores GPS y vehículos eléctricos, por ejemplo.

Como se puede ver en la gráfica izquierda de la figura 2, además, estos metales están presentes en una extensa lista de aplicaciones en lo relativo a iluminación en tubos fluorescentes y lámparas LED. Sin ellos no se pueden fabricar los paneles solares, se emplean en aplicaciones aeroespaciales, son imprescindibles en los sistemas de dirección de misiles, en las turbinas de aviones de combate y en usos médicos tan variados como la resonancia

Minerales de Tierras Raras

► Colección de 17 elementos químicos

► Componente vital en productos **High.Tech**

► China suministra al menos el 97% de las tierras raras del mundo

Algunos productos que contienen tierras raras:

Fluorescentes y lámparas de alta eficiencia energética
europio, terbio, ytrio



Turbinas eólicas
disprosio, neodimio, praseodimio, terbio

Fibra óptica

erbio, europio, terbio, ytrio



Vehículos híbridos:
disprosio, lantano, neodimio, praseodimio

ipods:
disprosio, neodimio, praseodimio, samario, terbio



Figura 1: Aplicaciones de la Tierras Raras

magnética o las cerámicas dentales. En la gráfica de la derecha de la misma Figura 2 se muestran las toneladas consumidas de los distintos tipos de óxidos para abastecer los requerimientos a cubrir en el mercado de imanes permanentes. Puede observarse que el óxido de neodimio supone el 70% del total.

Con los datos que se manejaban a fechas de 2000, el 20% de estos metales se empleaba en la formación de en la fabricación de imanes permanentes. Su valor prácticamente se ha duplicado cuando los datos corresponden al año 2008 (un 37%), duplicándose de nuevo en 2015. Por tanto actualmente cerca del 80% del mineral de tierras raras se emplea en producir imanes permanentes [8].

Los disparatados costes de las tierras raras no responden a que estas sean "raras" en el sentido de escasas. Estos materiales suelen aparecer como residuos de extracción de otros minerales, que en muchas ocasiones son minerales radioactivos, como el torio y el uranio. Esto dificulta terriblemente la explotación de los mismos ya que por cuestiones medioambientales, en algunos países como en la India, la producción está limitada a 2.700 Toneladas por año [10].

El mercado ha sido controlado progresivamente por China con una política de inversión en la explotación de los yacimientos existentes en este país, principalmente la gran mina de Baotou situada en la región autónoma de Mongolia Interior,

mina de Mountain Pass en USA en 2002, que desde la década de los 60 dominaba el mercado como puede verse en la Figura 3.

2. EVOLUCIÓN DEL MERCADO

A la vista de las cifras anteriores, la demanda de mercado de estos materiales creció a un ritmo anual entre el 4 y 6 % en los primeros años, pero actualmente la cifra que se maneja está entre el 10% y el 12%, refiriéndonos a los imanes sinterizados (los más habituales actualmente), sin que por el momento haya afectado a los aglomerados que, en nuestra opinión, serán lo que sufran una mayor evolución. En el caso del motor eléctrico MG2 del Toyota Prius, para proporcionar sus 55 kW utiliza 1 kg de imanes permanentes sinterizados, 11 kg de acero y 3 kg de cobre. El coste total del motor se estima en torno a los 660\$, de los cuales los imanes suponen el 60% de este coste, e, incluyendo la manufactura, el 70% [13].

Teniendo en cuenta que cada vehículo, suele llevar dos motores eléctricos que el número de unidades anuales, considerando solamente la marca Toyota en el 2015, ronda los 9 millones de unidades [4], se puede deducir fácilmente que hablamos en torno a las 15.000 toneladas de materiales de tierras raras. Si se incluye el resto de fabricantes las cantidades son asombrosas. Si además, dentro del sector transporte, se incluyen las bicicletas eléctricas, las cifras se disparan. Solo en Asia en el año 2016 se han vendido 32,8 millones de unidades [14] y, considerando necesario para la fabricación de las mismas entre 60 y 350 g., esto arroja unas producciones en torno a las 7.000 toneladas sólo para bicicletas.

Las tierras raras son una de las claves de la estrategia económica china, que busca el control de los metales críticos. En 1992 el presidente Deng Xiaoping dijo "Oriente Medio tiene el petróleo, China las tierras raras". Solo unos años después, otro presidente, Jiang Zemin, terminó de completarla "Mejora el desarrollo y las aplicaciones de las Tierras Raras y convierte la ventaja de recursos en superioridad económica" [5].

En el año 2013, en el mercado mundial de tierras raras, China era responsable de:

- Extracción de mineral: 97%.
- Separación de los óxidos a partir del mineral y posterior refinado: 97%.
- Separación de metales y generación de aleaciones: 89%.
- Fabricación de artículos diversos y componentes: 75%, aunque la autonomía es algo mayor, la dependen-

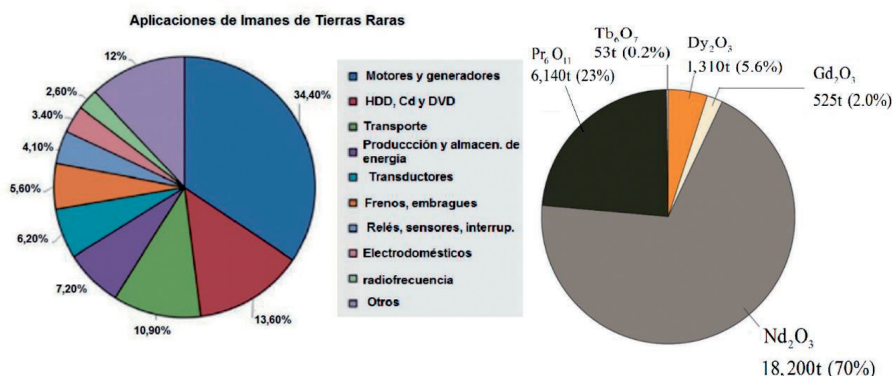


Figura 2: Usos de los imanes de Tierras raras [6] y distribución de consumo de óxidos de tierras raras para imanes permanentes en 2008. [7]

Todo lo anterior ha hecho que su demanda se haya incrementado de forma exponencial, que pasó de 1.1 toneladas anuales en 1993 a 85.000 en el 2003, alcanzó las 150.000 a finales de 2012 y en la actualidad está en torno a 200.000 toneladas, aunque para el 2020 China, para controlar sus recursos, pretende limitar su producción a 140.000 toneladas [9].

con el 70% de las reservas mundiales de tierras raras y considerado el lugar más tóxico del mundo [11]. La combinación de sus bajos costes de producción, junto con las pocas restricciones medioambientales de este país, ha hundido los precios y provocado el abandono de las inversiones en la explotación de estos recursos en los países occidentales, como el cierre de la

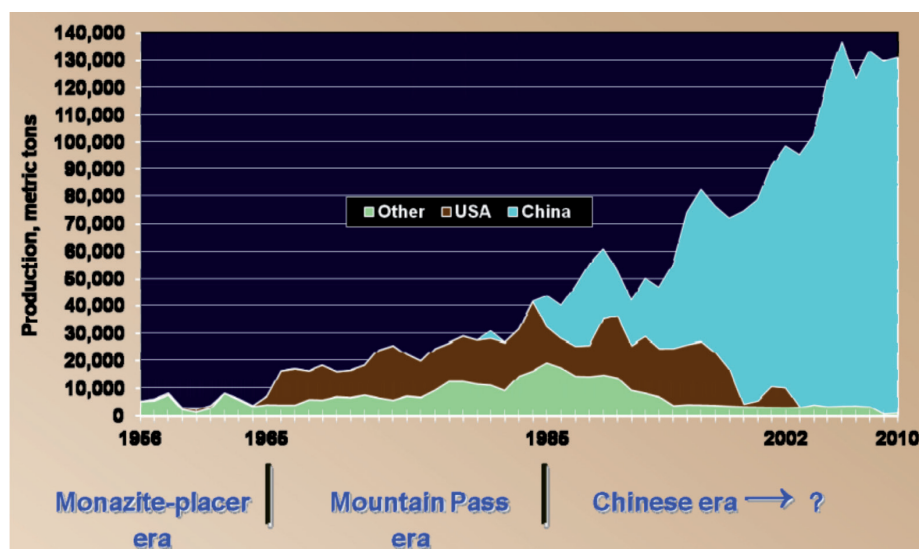


Figura 3: Evolución de la producción mundial de Tierras Raras [12]

cia es absoluta porque sin la materia prima no se puede fabricar nada.

La conclusión es inmediata: desde el momento en que un solo país controla completamente uno de los eslabones de la cadena y con amplia mayoría el resto, podemos hablar de un monopolio absoluto como así se indica en un informe de finales de 2010 de la *US-China Economic and Security Review Commission* [15]

El gobierno chino ha anunciado recientemente su intención de limitar las cuotas de exportaciones de materiales de RE, diferenciando en la actualidad entre tierras raras ligeras y pesadas, con el fin de abastecer sus propias necesidades y reforzar su posición en la cadena de valor como proveedores de imanes y motores. Esto ha conducido a gobiernos y fabricantes a examinar el papel de los imanes permanentes (PM) en las máquinas eléctricas y tratar de averiguar topologías y tecnologías que, o bien eliminan, o reducen la cantidad de los imanes RE.

Como puede verse en la Figura 4, el precio de los materiales de estos imanes desde el 2008 ha aumentado de forma constante. Su componente principal, el óxido de neodimio, llegó a alcanzar un 800% desde el año 2005, alcanzando un precio máximo de 480 \$/kg para el neodimio y 3.500 \$/kg para el disprosio, con un aumento superior al 2.000%. Este último elemento es vital para que los imanes sean capaces de mantener sus características magnéticas a temperaturas superiores a los 100 °C, habituales en motores de vehículos híbridos.

La volatilidad de los precios de estos materiales es impredecible, con un constante ascenso hasta 2012, cuando se produjo una caída de los precios por distintas razones, entre las que destaca la crisis económica y el terremoto de Japón. Los minerales de las minas californianas, cerradas en 2002, ya no eran competitivas en precio y garantizó el monopolio chino. Los datos obtenidos en [17] en 2013 se muestran en la Tabla 1, los cuales no han variado sustancialmente en los últimos años. Este mercado de los materiales magnéticos, que no sigue las reglas ha-

Elemento	Precio (\$/kg)
Nd	120
Sm	80
Dy	650
Co	26
Zr	60

Tabla 1: Precios medios de tierras raras en 2013. [17]

bituales, hoy en día mueve 2 billones de dólares.

Todas estas circunstancias obligan a reconsiderar de nuevo la posibilidad del uso de imanes de samario-cobalto, especialmente a altas temperaturas de funcionamiento (*Ver material extra*).

3. SITUACIÓN FUTURA

Estados Unidos ya considera la dependencia, en lo que a estos elementos estratégicos se refiere, como un problema de seguridad nacional. Con el objetivo de posicionar adecuadamente el problema, el departamento de energía de Estados Unidos (DOE) ha establecido una matriz de criticidad de materiales a medio plazo (5-15 años), para ello clasifica los parámetros en dos ejes y asigna un valor del 1 al 4 a cada uno:

En la Figura 5 se observa que los materiales de las tierras raras Nd y Dy se en-

cuentran en los valores máximos de criticidad. El eje de ordenadas tiene que ver con la importancia en el desarrollo de las energías limpias:

- Demanda de la aplicación específica
- Posibilidades de sustitución

El eje de abscisas está relacionado con la criticidad en el suministro:

- Disponibilidad
- Demanda en tecnologías alternativas
- Factores políticos de regulación y sociales.
- Dependencia de otros mercados
- Diversidad de producción

La situación actual del mercado es compleja, por los siguientes motivos:

- **Concentración del mercado:** se prevé que el desarrollo de minas en otros lugares como Australia y Vietnam minimicen este problema.

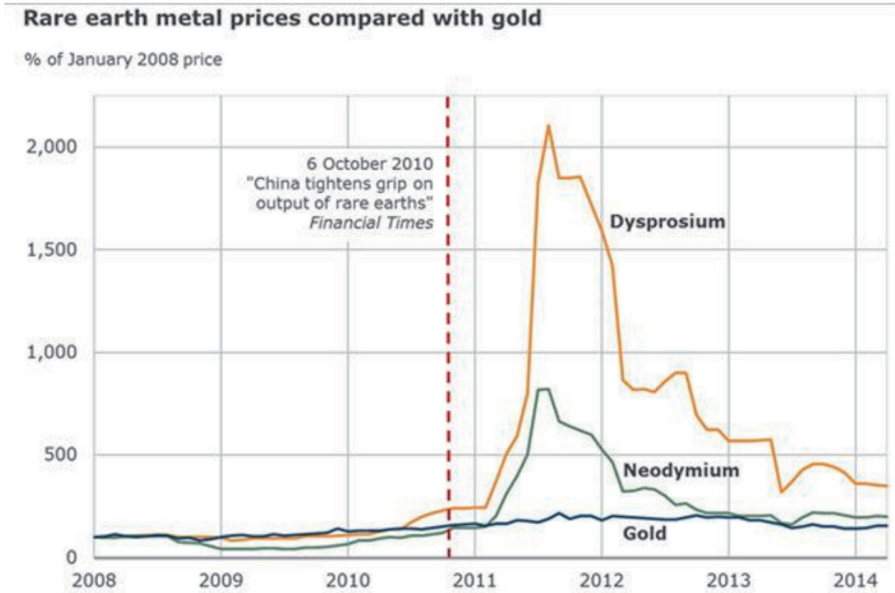


Figura 4: Evolución comparativa con el oro de los precios de los óxidos RE hasta 2010 [16]

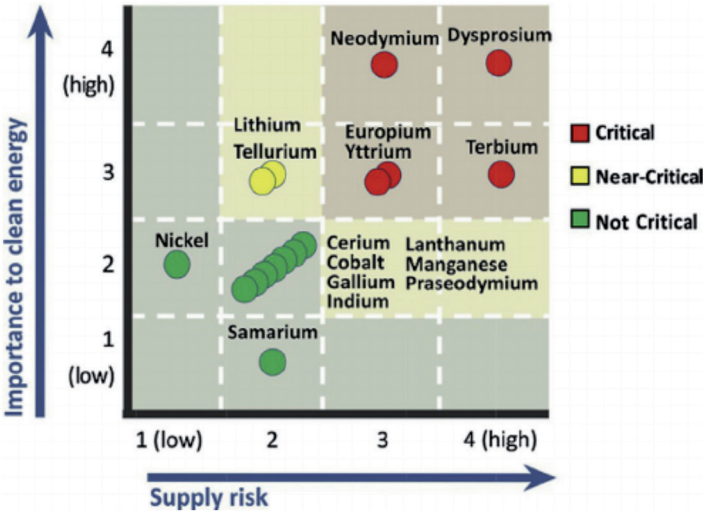


Figura 5: Tabla de criticidad de tierras raras [18]

- **Opacidad del mercado:** como actualmente toda la cadena de procesamiento está en China las peculiaridades de su gobierno lo hacen especiales.
- **Requerimiento de capital:** para arrancar una mina un billón de dólares.
- **Conocimientos elevados** en los pasos de procesamiento.
- **Requerimientos de regulación medioambientales:** complicados especialmente en las primeras fases ya que las tierras raras suelen aparecer mezclados con otros materiales de carácter radioactivo por su proximidad en la tabla periódica.
- **Requerimientos de tiempo** por encima de los diez años para comenzar la producción.

Un dato bastante indicativo es que la industria de la Defensa también se ha puesto a trabajar en este tema. Lo delata el hecho de que la multinacional aeroespacial y de defensa Boeing se haya lanzado en 2010 a la búsqueda de los mencionados minerales, firmando un acuerdo con la empresa Tierras Raras Inc. para comenzar la explotación de minas en los estados de Idaho y Montana y ayudará en las prospecciones para hallar nuevos yacimientos.

Afortunadamente, la planta en cuestión ya lleva cuatro años de rodaje mientras que India, Malasia y Australia cuentan ya con otras plantas de producción de tierras raras. Otros países como Australia, Brasil, Canadá o Argentina planean abrir minas o están realizando prospecciones para encontrar los preciados elementos.

4. RECICLAJE

Como ya se ha indicado, la criticidad de estas tierras raras es tan elevada que determinadas empresas corren riesgo de desabastecimiento. Esta crisis ha empujado a probar soluciones como la reutilización.

En la actualidad, el porcentaje de reciclaje de imanes de tierras raras es menor del 1%. Esta cifra debería de crecer especialmente en aquellos países que no tienen minería, como Europa. Estos valores tan bajos se deben a que el valor de los óxidos, que potencialmente se pudieran recuperar mediante el reciclado, es insuficiente para cubrir los costes del proceso basados en la tecnología actual si se compara con los precios de los imanes manufacturados en China. Sin embargo, si el nivel de escasez sigue aumentando se-

ría necesario el avance de las técnicas de reciclado "minería urbana" y la reapertura y búsqueda de nuevas minas.

Se define la tasa de reciclaje (*Rate Recycling* o RR) como el producto de la tasa de recuperación por el rendimiento del proceso de reciclaje. Las estimaciones más precisas arrojan datos para esta tasa de recuperación entre un 30% como valor pesimista y un 60% y como valor del rendimiento, el 55%. Por tanto, la RR tomaría valores finales entre un 16,55 y un 33% en 2020. La RR siempre se refiere al reciclaje funcional, lo que no incluye aplicaciones que no se refieran específicamente a la fabricación de imanes, por ejemplo, lo empleado en chatarra férrea (*down recycling*).

Existen varias posibilidades para el proceso de reciclaje de imanes RE:

A.- El reciclado directo (*direct recycling*) o reutilización (*re-use*), que consiste en volver a utilizar los imanes en su forma actual y, aunque es el método más obvio por su simpleza, sólo es de importancia para grandes imanes de fácil acceso como los que se emplean en turbinas eólicas (250-600 kg/MW) y en los vehículos eléctricos como el Prius (1-1,5 kg) que requieren desmantelamiento manual. Precisamente, la separación de los imanes de los equipos debido a la compleja estructura de unión física se identifica como uno de los principales obstáculos para el reciclaje de los imanes. Los imanes que incluyen los automóviles convencionales suponen apenas unos 250gr y se machacan con el resto de chatarra del vehículo.

Estas aplicaciones tienen una vida muy larga, al menos 15 años, lo que hace que apenas haya chatarra suficiente que haya alcanzado el fin de su vida útil.

B.- En el caso de pequeños imanes obtenidos de los productos de consumo una vez finalizado su ciclo de vida (WEEE) *Waste Electrical & Electronic Equipment*, es necesario reprocesar los imanes hasta conformar unos nuevos de características similares. El método ha sido desarrollado por la Universidad de Birmingham [19], se describe brevemente más adelante.

C.- Para poder recuperar los óxidos individualmente a partir de chatarra es necesario aplicar técnicas metalúrgicas de separación. Inicialmente el proceso consiste en moler bien todo el material para

luego separar por metales. Puede aplicarse: Decrepitación con hidrogeno, hidrometalurgia, pirometalurgia y extracción en fase gaseosa.

Para otro tipo de materiales "preciosos", como el cobre, sí que existen técnicas de separación bien electrostáticas o por fundición, en el caso de metales como el neodimio aún no están bien desarrolladas.

Estas rutas químicas requieren una importante cantidad de energía, pero admiten con más facilidad las diferentes composiciones que no serían aceptables para un reprocesamiento directo.

D.- Una última posibilidad, que no es estrictamente reciclaje, es volver a emplear los restos de mineral producidos en todo el proceso de manufactura, calculados hasta un 30% si incluyen los residuos de las bauxitas y los minerales. Una de las principales ventajas de este reciclaje es que los materiales no contienen torio ni uranio, como el material obtenido de las minas.

Las unidades de disco duro (HDD) son probablemente la fuente más importante de chatarra de REE hoy en día. Los discos duros no sólo son fáciles de identificar y muy abundantes entre los residuos electrónicos y equipos eléctricos (WEEE) y tienen una rápida rotación aproximadamente cinco años. Hay dos imanes en un disco duro: un imán de tipo aglomerado en el motor que hace girar el disco y otro imán sinterizado en el motor que controla la cabeza de lectura. Se estima que aproximadamente se fabrican anualmente 600 millones de discos duros [20]. Con una cantidad media entre 10 y 20 g de NdFeB en cada disco duro, podrían obtenerse entre 6.000 a 12.000 toneladas de aleaciones de neodimio.

Para poder recuperar éstos la única posibilidad que cabe es extraer previamente los imanes. En caso de ser triturados con el resto, como además son muy quebradizos se adhieren muy fácilmente al resto de la chatarra y complica excesivamente su separación.

El método aplicado por Walton en 2012 [19] inyecta hidrógeno a presión atmosférica y temperatura ambiente, las fases ricas de Neodimio forman $NdH_{2,7}$ mediante una reacción exotérmica que hace que el conjunto de imán sufra un aumento de volumen del 5% para luego romperse en el polvo, desprendiéndose de la cobertura de níquel. Este proceso se ha denominado *Hydrogen Processing of Magnet Scrap* (HPMS).

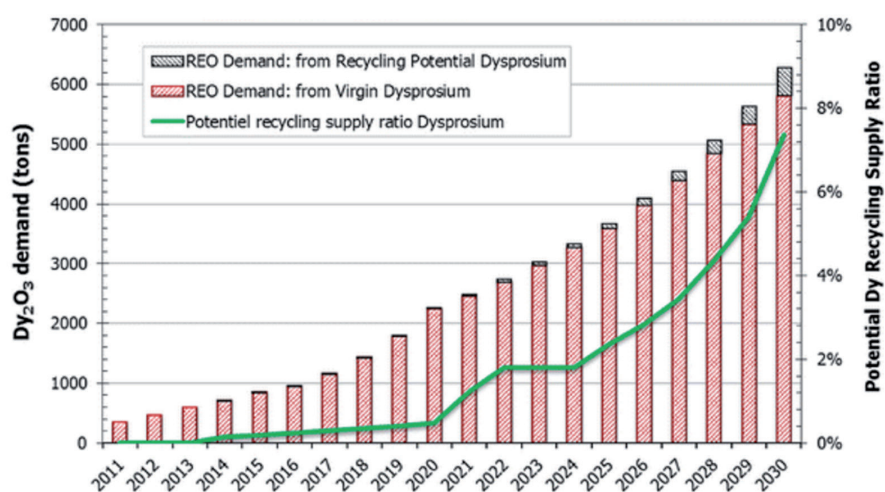


Figura 6: Previsión de demanda y reciclaje de óxido de disprosio [21]

Posteriormente se introduce en un tambor poroso para separar las pieles de Níquel y el resto de componentes electrónicos. La pequeña cantidad de Níquel que aún permanece se elimina en los tamizadores del siguiente paso. Finalmente, el polvo obtenido se vuelve a reprocesar en nuevos imanes sinterizados o lo que se considera más interesantes aglomerados siendo la mayor tendencia utilizar procesos HDDR. Se está probando resina de nylon como aglomerante en las últimas pruebas.

La tasa de recuperación con este método alcanza el 95%. En el proceso se absorbe algo de oxígeno por lo que disminuye su producto de energía.

Hitachi Ltd y Mitsubishi también están desarrollando técnicas para desmantelar imanes utilizados en equipos de aire acondicionado [18]. Su método, que se basa simplemente en la separación de los distintos elementos por impacto y vibración, quiere alcanzar una cuota de reciclado del 10% de sus materiales.

El reciclado de tierras raras está de actualidad en todas sus aplicaciones. Como se muestra en la Figura 6, la previsión de la demanda de disprosio es exponencial y aunque en la actualidad apenas se recicla, las expectativas prevén un claro aumento progresivo.

En otros ámbitos, los químicos de la universidad belga KU Leuven han desarrollado un proceso innovador, basado en la tecnología de líquido iónico, para reciclar el metal Europio (muy escaso en la naturaleza) y el Ytrio (una tierra rara) que se utilizan en las lámparas fluorescentes y de bajo consumo. Estos metales se pueden reutilizar en nuevas lámparas.

PARA SABER MÁS

- [1] COMMISSION, E., Report from the Commission to The European Parliament, The Council, The European Economic and Social Committee and The Committee of The Regions. Renewable energy progress report 2015. p. 16.
- [2] Gouveia, E.M., et al. Safe operation of transmission system considering EV at distribution level. in Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2016 IEEE 16th International Conference on. 2016. IEEE.
- [3] Lopes, J.A.P., F.J. Soares, and P.M.R. Almeida, Integration of electric vehicles in the electric power system. Proceedings of the IEEE, 2011. 99(1): p. 168-183.
- [4] Congress, G.C. Worldwide sales of Toyota hybrids surpass 9 million units. 2016 [cited 2017; Available from: <http://www.greencarcongress.com/2016/05/20160520-tmc.html>].
- [5] Tse, P.-K., China's rare-earth industry. 2011: US Department of the Interior, US Geological Survey Reston.
- [6] Brown, D., et al., Dysprosium-free melt-spun permanent magnets. Journal of Physics: Condensed Matter, 2014. 26(6): p. 064202.
- [7] Goonan, T.G., Rare earth elements: End Use and Recyclability. 2011, US Geological Survey.
- [8] Kingsnorth, D.J. Rare earths: facing new challenges in the new decade. in SME Annual Meeting. 2010.
- [9] COUNCIL, T.S. and T.P.S.R.O. CHIN, China sets limit on annual rare earth mining volume by 2020. 2016: ENGLISH.GOV.CN.
- [10] Sequera, F.J.F.-C. La Geopolítica de las "Tierras Raras": El nuevo oro negro. 2013; Available from: <http://lagranpartida.blogspot.com.es/2013/06/la-geopolitica-de-las-tierras-raras-el.html>.
- [11] Maughan, T. ¿Qué hicimos para crear un tenebroso lago tóxico? BBC Mundo 2015.
- [12] Gambogi, J. Global Rare Earth Oxide (REO)

Production Trends 2012.

- [13] Widmer, J.D., R. Martin, and M. Kimiabeigi, Electric vehicle traction motors without rare earth magnets. Sustainable Materials and Technologies, 2015. 3: p. 7-13.
- [14] Leiber, N. Electric Bikes Won Over China. Is the U.S. Next? BloombergBusinessWeek, 2016.
- [15] COMMISSION, U.S.-C.E.A.S.R., 2010 Report To Congress, in ONE HUNDRED ELEVENTH CONGRESS U.S. GOVERNMENT, Editor. 2010: Washington. p. 324.
- [16] Rowlett, J., Rare earths: Neither rare, nor earths. 2014.
- [17] www.mining.com. Your Source for Global Mining News. 2015.
- [18] Chu, S., Critical Materials Strategy, ed. U.S.D.o. Energy. 2011: DIANE Publishing.
- [19] Walton, A., et al., The use of hydrogen to separate and recycle neodymium-iron-boron-type magnets from electronic waste. Journal of Cleaner Production, 2015. 104: p. 236-241.
- [20] Yang, Y. Recovery of rare earth metals from end-of-life permanent magnet scrap: an overview. in Proceedings of ERES2014: 1st European Rare Earth Resources Conference. Milos, Greece: Heliotopos Conferences Ltd. 2014.
- [21] Yang, Y., et al., REE Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap: A Critical Review. Journal of Sustainable Metallurgy, 2017: p. 1-28.
- [22] Rajashekar, K., Present status and future trends in electric vehicle propulsion technologies. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2013. 1(1): p. 3-10.
- [23] Constantinides, S. The demand for rare earth materials in permanent magnets. in 51st Annual Conference of Metallurgists. 2012.
- [24] Benecki, W.T., Hitachi Metals, Ltd. - The Magnet Industry Newsmaker, Www.mining.com, Editor. 2013, Magnetism Magazine: www.magnetismmagazine.com. p. 5.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/8398-1.pdf

