

MATERIALES CRÍTICOS Y SOSTENIBILIDAD: LAS TIERRAS RARAS Y LOS IMANES QUE POSIBILITARÁN UNA EUROPA MÁS VERDE

Alberto Bollero Real

Coordinador del Programa “Nanociencia - Materiales Críticos y Sostenibilidad” y Director del Grupo de Imanes Permanentes y Aplicaciones en IMDEA Nanociencia, Madrid.

RESUMEN

La posibilidad de alcanzar una Europa más verde, con un sistema de transporte electrificado y un uso optimizado de las energías renovables, sustentada a su vez por un modelo económico circular se ve seriamente amenazada. El principal motivo es que Europa depende de materiales que no está produciendo y que precisa para poder construir los motores de los vehículos eléctricos y de las turbinas eólicas, entre otros muchos dispositivos, pilares fundamentales de la transición ecológica. Por si esto no fuera suficiente, Europa recicla menos de un 1% de estos valiosos materiales. Existen soluciones y existen alternativas fruto de la innovación, pero el tiempo juega un papel importante y solamente una estrategia bien definida de rápida aceptación e implementación pueden abrir el horizonte verde anhelado.

1. LA LEY EUROPEA DE LAS MATERIAS PRIMAS CRÍTICAS

El 16 de marzo de 2023 la Comisión Europea publicó el denominado “Critical Raw Materials Act” (CRM Act), documento por el cual se establecen una serie de recomendaciones para garantizar que la Unión Europea (UE) disponga de un suministro seguro y sostenible de materiales críticos [1]. Este documento siguió a las declaraciones que la presidenta de la Comisión, Ursula von der Leyen, realizó en 2022 al anunciar el CRM Act: *“El litio y las tierras raras pronto serán más importantes que el petróleo y el gas. Sólo nuestra demanda de tierras raras se quintuplicará para 2030. Debemos evitar volver a ser dependientes, como sucedió con el petróleo y el gas”*.

Este artículo comienza haciendo alusión al CRM Act, por la trascendencia que puede tener, si su implementación se efectúa de un modo efectivo en los Estados Miembros, sobre el futuro desarrollo tecnológico en Europa. La problemática a la que alude dicho documento es igualmente compartida por potencias económicas mundiales como son Estados Unidos y Japón.

El documento publicado por la UE establece los siguientes puntos de referencia a lo largo de la cadena de valor de las materias primas estratégicas para garantizar la diversificación de los suministros:

- (i) al menos el 10% del consumo anual de la UE ha de proceder de la extracción minera en Europa;
- (ii) al menos el 40% del consumo anual ha de provenir de procesado de la UE;
- (iii) al menos el 15% del consumo anual de la UE ha de proceder del reciclaje;
- (iv) no más del 65% del consumo anual de la UE ha de provenir de un único tercer país.

Estos materiales críticos (entre los que se encuentran las tierras raras, el litio, el cobalto...) son cruciales para el desarrollo de las tecnologías verdes, así como para tecnologías digitales, de defensa y espaciales. Un coche eléctrico requiere entre 1.5 y 2 kg de este tipo de imanes (mayoritariamente en el motor de tracción, pero también en multitud de sensores, contándose en más de 200 los imanes integrados en el coche). El motor de una turbina eólica precisa de hasta 4 toneladas de imanes permanentes. La UE importa aproximadamente un 98% este tipo de imanes de China, con más del 90% de la producción de tierras raras concentrada en China. Llama poderosamente la atención que Europa sea uno de los productores mundiales de energía eólica (España encontrándose en el quinto lugar a nivel mundial), y que la tecnología que lo hace posible esté supeditada al abastecimiento de un 98% de los materiales que mueven los aerogeneradores.



Es por ello que, ya sea porque su producción se encuentra monopolizada en un reducido número de países (con los que debido al modelo político en vigor o a inestabilidades políticas, sociales y económicas no es posible establecer un acuerdo estable de abastecimiento) o por su previsible escasez, dichos materiales son considerados críticos. Una adecuada implementación de las propuestas establecidas en el CRM Act por parte de los Estados Miembros contribuiría a cubrir la demanda de sectores estratégicos clave para alcanzar los objetivos del pacto climático y digital fijados por la UE para el año 2030 [2].

2. LAS TIERRAS RARAS Y LOS IMANES PERMANENTES

La demanda de la UE de tierras raras, elementos clasificados dentro del grupo de materiales críticos, se estima que se verá multiplicada por cinco en el año 2030. Las tierras raras agrupan a un conjunto de 17 elementos y reciben esta denominación, no porque sean elementos escasos en la corteza terrestre, sino porque se suelen encontrar en un bajo contenido en determinados minerales, lo cual requiere de complejos procesos de separación y refinado.

El motivo del aumento en el uso de algunos de estos elementos responde principalmente a la necesidad de los mismos en la fabricación de los imanes permanentes utilizados en los motores de vehículos eléctricos y de aerogeneradores. El campo de aplicaciones de este tipo de imanes es muy extenso (Figura 1).

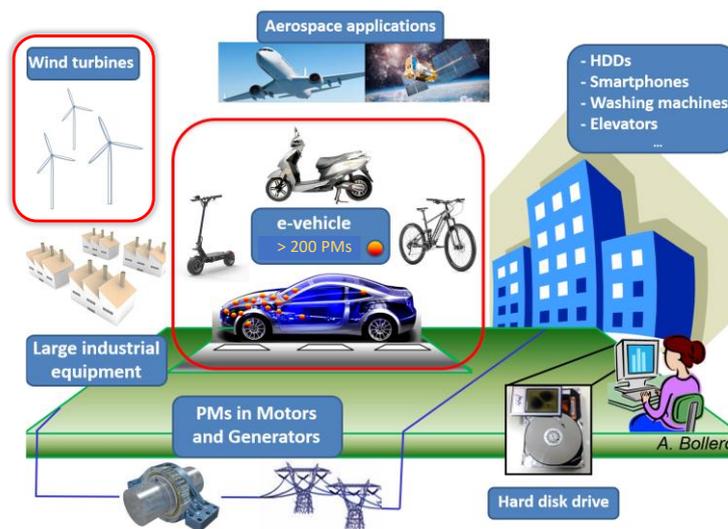


Figura 1. Ilustración de algunos de los sectores clave de aplicación de los imanes permanentes.

Se trata de imanes que contienen aproximadamente un 30% de tierras raras (mayoritariamente neodimio (Nd), pero también disprosio (Dy) y terbio (Tb), estos últimos elementos de gran importancia para garantizar una adecuada funcionalidad de los imanes a las temperaturas de operación requeridas), además de hierro y boro. Habitualmente se les conoce abreviadamente como imanes de Nd-Fe-B (aunque esta notación simplificada omite la importante presencia de Dy y Tb, entre otros elementos, en la formulación). Dentro de las tierras raras, están las denominadas tierras raras ligeras (el Nd se encuentra entre ellas) y las pesadas (como el Dy y el Tb). Son estas últimas las que presentan una mayor criticidad ya que los yacimientos se encuentran ubicados principalmente en China (frente a las tierras raras ligeras con yacimientos más abundantemente distribuidos globalmente, aunque muchos de ellos no se encuentren actualmente en explotación). Esta dependencia pone de manifiesto la enorme fragilidad del modelo económico sobre el que Europa ha venido sustentando durante todo este tiempo su desarrollo tecnológico.

El conflicto bélico en Ucrania, con el consiguiente impacto en el suministro energético y en el abastecimiento de materias primas (no solamente cereales sino también níquel, aluminio, manganeso... elementos necesarios para poder llevar a cabo la transición ecológica), no hizo más que poner de manifiesto que la Unión Europea ha de garantizar urgentemente un suministro estable de aquellos materiales estratégicos necesarios para su desarrollo tecnológico. La vulnerabilidad de Europa (al igual que la de Estados Unidos y Japón) en lo concerniente a las tierras raras ya quedó de manifiesto en 2010 con la denominada “crisis de las tierras raras”. Esta crisis se inició debido a las abusivas restricciones impuestas por China a la exportación de tierras raras y que desembocaron en una demanda conjunta - por vez primera en la historia- por parte de Estados Unidos, la Unión Europea y Japón ante la Organización Mundial del Comercio. China incrementó en 2011 los precios de las tierras raras hasta valores nunca vistos, multiplicando hasta por 30 el precio de tierras raras tan importantes como el disprosio en los imanes de Nd-Fe-B. Los precios comenzaron a bajar en 2012 pero desde entonces la volatilidad en los precios, con continuas e imprevisibles subidas y bajadas, han puesto en peligro el sistema de previsión del entramado industrial europeo (siendo las pequeñas y medianas empresas - motores de la economía- las más afectadas por esta dramática situación derivada de una dependencia casi absoluta de China).

Los imanes de Nd-Fe-B (con la fórmula empírica $Nd_2Fe_{14}B$) fueron descubiertos en el año 1982, simultáneamente en Japón (Sumitomo Special Metals Corporation) y en Estados Unidos (General Motors Research Laboratories) [3,4]. Curiosamente, estos imanes surgieron de la investigación desarrollada en respuesta a la “crisis del cobalto” que se inició en la década de los años 70, debido a los problemas de suministro de las zonas mineras de la R.D. del Congo (conocida como Zaire en el período 1971-1997) [5]. El cobalto se utiliza en la fabricación de los imanes de samario-cobalto (Sm-Co), los

cuales eran por aquel entonces los imanes más potentes del mercado. Hoy en día son los imanes de Nd-Fe-B los que ostentan esta posición (siendo los de Sm-Co los que ofrecen un comportamiento superior a elevadas temperaturas, algunos de ellos pudiendo operar por encima de los 300°C).

3. LÍNEAS DE ACTUACIÓN PARA UN FUTURO TECNOLÓGICO SOSTENIBLE

En base a lo expuesto, cabe preguntarse cuáles podrían ser las líneas de actuación que posibiliten un cambio en un modelo que en la actualidad dista mucho de ser sostenible. Los pilares sobre los que se sustentará un desarrollo tecnológico sostenible en Europa, en lo relativo a los imanes permanentes, pueden resumirse en:

1. Innovación en materiales:
 - (a) Imanes de Nd-Fe-B.
 - (b) Imanes libres de tierras raras.
2. Reciclaje de los materiales.
3. Acceso seguro a los materiales necesarios para su producción en Europa.

3.1 Innovación en materiales.

Investigación en imanes de Nd-Fe-B

La innovación en el desarrollo de los imanes de Nd-Fe-B cubre en la actualidad líneas de actuación bien definidas entre las que cabe destacar:

- (i) Ingeniería optimizada a nivel estructural de los imanes de Nd-Fe-B. El campo coercitivo (intensidad del campo magnético necesario para desmagnetizar el imán) solamente alcanza en la actualidad aproximadamente un 20% de su potencial (debido a defectos estructurales, fases secundarias, etc.). Esta cifra llama poderosamente la atención cuando recordamos que el descubrimiento de este tipo de imanes data del año 1982. La aplicación de la nanociencia y la nanotecnología posibilitan investigar qué ocurre a escala nanométrica en las fronteras de grano cristalino, lugar en donde tiene su origen la aparición de efectos adversos, y actuar en consecuencia mediante nuevas aproximaciones trasladables a producción industrial.
- (ii) Reducción en el uso de elementos de tierras raras pesadas (en particular el disprosio). La denominada difusión en las fronteras de grano es una aproximación eficiente en la que el procesado de los imanes requiere de un menor contenido de Dy, el cual se distribuye en un gradiente composicional que evoluciona desde la superficie del imán hacia su interior. Como consecuencia, las propiedades del imán (y su eficiencia con la temperatura) evolucionan con dicho gradiente, lo cual en principio puede verse como un inconveniente. Un rediseño del dispositivo final (por ejemplo, del motor) permite suplir ese inconveniente.
- (iii) Eliminación de las tierras raras pesadas. Aunque esta aproximación no es en absoluto trivial, hay investigaciones enfocadas a tratar de sustituir el Dy por tierras raras económicas y muy abundantes como es el cerio (Ce). Sin embargo, y para lograr un adecuado funcionamiento del imán sin Dy al aumentar la temperatura, puede ser necesaria la utilización de elementos adicionales que también pueden ser críticos (por ejemplo, cobalto). Diversas actividades, algunas de ellas muy prometedoras, se encuentran actualmente en curso.

Investigación en imanes permanentes sin tierras raras.

Existe un enorme interés en la búsqueda de alternativas a los imanes de Nd-Fe-B que puedan cubrir la enorme brecha existente entre estos imanes y los basados en ferritas. La Figura 2 ilustra el desarrollo histórico de los distintos tipos de imanes permanentes, mediante la representación de la

evolución en el tiempo del denominado producto energético máximo, $(BH)_{max}$, el cual es un indicador de la densidad energética del imán.

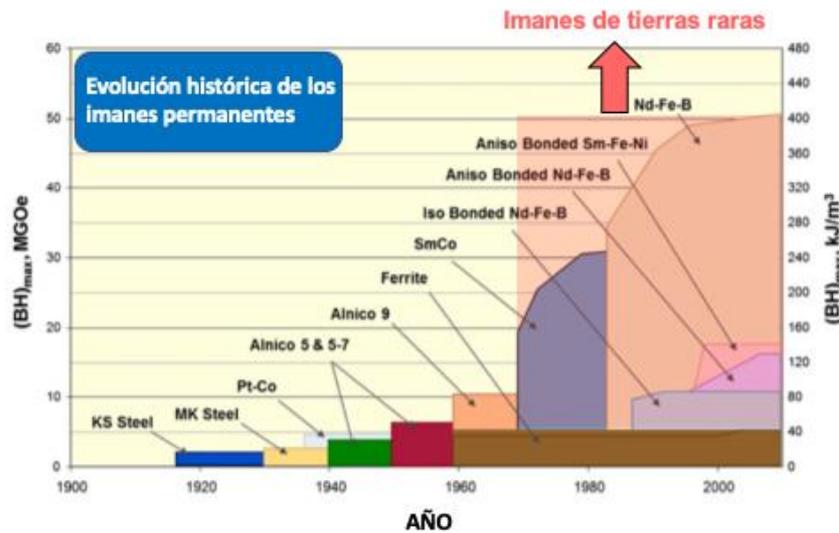


Figura 2. Evolución temporal de los materiales de imán permanente. El área en rojo indica aquellos imanes basados en tierras raras. [Adaptado de M. J. Kramer et al., JOM 64, 752 (2012)].

Si bien es cierto que el producto energético del imán determina en primera instancia su campo de aplicaciones, hay que tener en cuenta otros factores adicionales que permitirán decidir si el imán seleccionado será el más adecuado para la aplicación final deseada:

- Densidad del material.
- Temperatura (máxima y mínima) de operación.
- Resistividad.
- Resistencia química y frente a la corrosión.
- Facilidad de mecanizado.

La búsqueda de materiales alternativos que, a pesar de tener un producto magnético inferior, permitan suplir desventajas de los imanes de Nd-Fe-B puede abrir nuevas oportunidades de mercado en Europa. En este sentido, sí que resulta de gran importancia llevar a cabo una diversificación inteligente, entendida como una sustitución bien enfocada para evitar una saturación del mercado con una excesiva variedad de materiales (que probablemente hagan uso de elementos indispensables para otras aplicaciones tecnológicas repercutiendo, por tanto, en un aumento de la lista de materiales críticos que la Comisión Europea revisa y actualiza periódicamente a través de sus expertos).

Entre los materiales más prometedores a corto plazo se encuentran los imanes basados en aleaciones de manganeso (en particular, manganeso-aluminio-carbono Mn-Al-C y, para aplicaciones de bajo volumen con altos requerimientos en temperatura, manganeso-bismuto Mn-Bi) y las ferritas de calidad mejorada [6,7]. Este tipo de materiales se espera que puedan sustituir a los imanes plásticos (comúnmente conocidos en inglés como “bonded”) de Nd-Fe-B. Este tipo de imanes contienen por lo general un bajo contenido de polímero o resina (habitualmente entre un 3 y un 5 %, aunque este contenido puede incrementarse si no se requiere de una densidad magnética elevada en la aplicación final). La utilización del polímero o resina permite fabricar geometrías más complejas que las que normalmente pueden alcanzarse mediante el sinterizado tradicional. Esto se logra mediante técnicas de inyectado en un molde pre-fabricado con la geometría deseada. Es interesante realizar una breve descripción de estas alternativas que se plantean a corto plazo (3-5 años):

- (i) Aleaciones basadas en manganeso.

Dentro de estas aleaciones conviene centrarse particularmente en dos:

- Aleación Mn-Al-C.

La fase que se comporta como imán permanente (única fase ferromagnética en este sistema) es la fase $L1_0$ -MnAlC (o tau-MnAlC), la cual es una fase ordenada metaestable. Esta fase presenta claras ventajas respecto al Nd-Fe-B, a pesar de su inferior producto energético: una densidad inferior (5.2 g/cm^3 frente a 7.6 g/cm^3 para el $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) lo cual permitirá desarrollar imanes más ligeros, y una mayor resistencia a la corrosión que, dependiendo de las aplicaciones, podría evitar el uso de recubrimientos. Este último punto es extremadamente importante si consideramos que los imanes de Nd-Fe-B requieren de recubrimientos (típicamente basados en níquel) que aumentan el coste del imán y cuya calidad y homogeneidad son decisivos para garantizar la durabilidad del mismo. Además, la temperatura máxima de operación de la fase tau-MnAlC es aproximadamente igual a la del NdFeB. El Mn y el Al tienen un coste inferior a los 3 eur/kg frente a un coste de aproximadamente 100 y 500 eur/kg para el Nd y el Dy, respectivamente.

- Aleación Mn-Bi.

Al igual que en el Mn-Al-C teníamos una fase que se comporta como imán permanente, en este caso es el desarrollo de la denominada fase LTP-MnBi la que nos permitirá la fabricación de imanes permanentes basados en Mn-Bi. Existe una discusión controvertida acerca de la viabilidad de llevar a producción industrial este tipo de imanes. El motivo de esta discusión deriva del hecho de que el bismuto, a pesar de ser un elemento de muy baja toxicidad, se obtiene principalmente como subproducto del refinado del plomo. La fase LTP-MnBi presenta unas propiedades magnéticas muy atractivas para aplicaciones tecnológicas. Entre ellas cabe destacar un coeficiente positivo de la coercitividad, lo cual se traduce en que la coercitividad aumenta al incrementar la temperatura al contrario de lo que ocurre con el $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Esta propiedad permite que los imanes basados en Mn-Bi puedan operar a temperaturas muy superiores a los imanes de Nd-Fe-B sin riesgo de desmagnetización.

(ii) Ferritas con propiedades mejoradas.

Entre las ferritas magnéticamente duras se encuentran las basadas en bario (Ba) y las basadas en estroncio (Sr). Son estas últimas (con formulación $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) las que encuentran en la actualidad una mayor cuota de mercado. Los imanes de ferrita son de los imanes más utilizados en nuestra tecnología diaria y cuentan con la mayor producción mundial en peso. Al igual que ocurre con los imanes permanentes basados en aleaciones de manganeso, el producto energético es muy inferior al de los imanes de Nd-Fe-B. Sin embargo, son las siguientes características las que están promoviendo un exitoso desarrollo de las ferritas duras como sustitutos de los imanes plásticos de Nd-Fe-B e incluso de los sinterizados en determinadas aplicaciones:

- Abundancia de los elementos constituyentes y bajo coste (dos órdenes de magnitud inferior a los de Nd-Fe-B). España es el primer productor mundial de estroncio, lo cual nos sitúa en una posición privilegiada.
- Reducido impacto medioambiental tanto en lo relativo al proceso de extracción como al posterior procesado.
- Son eléctricamente aislantes evitando corrientes parásitas (ventaja al pensar en su aplicación en motores eléctricos).
- Son químicamente inertes y presentan una alta resistencia frente a la corrosión. Estas características hacen posible que su procesado pueda realizarse al aire, sin necesidad de atmósfera protectora (en comparación con el Nd-Fe-B). Además, este material cerámico ya es de por sí un óxido por lo que no precisa de ningún recubrimiento externo para protegerlo frente a la oxidación.

- Al igual que ocurre con el Mn-Bi, la ferrita de estroncio presenta una coercitividad que aumenta con la temperatura de operación, disminuyendo, por tanto, su riesgo de desmagnetización.

La posibilidad de un rediseño del producto final está permitiendo que la mejora en las propiedades de las ferritas gane terreno en aplicaciones que tradicionalmente han sido relegadas a imanes de Nd-Fe-B [7]. El objetivo realista no pasa por sustituir los imanes del motor de tracción de un coche convencional (la ganancia en volumen y peso, sumados a la necesidad de un mayor consumo de cobre, harían esta posibilidad económicamente inviable), pero sí de sustituir diversos imanes de Nd-Fe-B utilizados en multitud de automatismos de los vehículos. Más allá, de estas aplicaciones de bajo volumen, sí que es viable la sustitución de imanes de Nd-Fe-B en vehículos de menor tamaño como patinetes, bicicletas y motocicletas eléctricos. El proyecto europeo “NANOPYME” [8] demostró en 2015 la posibilidad de sustituir los imanes de Nd-Fe-B en un prototipo de motocicleta eléctrica. Extrapolando esta aplicación, sí que sería previsible la fabricación de un coche para uso urbano (reducidas dimensiones y velocidad reducida) basado en imanes permanentes mejorados de ferrita.

Existe en la actualidad una iniciativa europea de gran envergadura (entre las mayores a nivel mundial, la cual cuenta con financiación público-privada), coordinada desde España, para el desarrollo industrial de imanes permanentes de Mn-Al-C y ferrita de estroncio de calidad mejorada (excelente estabilidad térmica a altas y bajas temperaturas): el proyecto europeo “PASSENGER: Pilot Action for Securing a Sustainable European Next Generation of Efficient Rare Earth-free magnets” [9]. Este proyecto agrupa a 20 centros (13 empresas) de ocho países europeos. Se trata, en el momento de escribir este artículo, del único proyecto europeo en curso de esta magnitud enfocado al desarrollo industrial de imanes permanentes libres de tierras raras. El proyecto tiene como objetivo desarrollar un modelo de sustitución sostenible en imanes permanentes, subdivididos en 8 innovadoras plantas piloto para el año 2025 que cubrirán toda la cadena de valor e incluirán la electromovilidad como principal sector clave.

Tan importante como es la innovación en el desarrollo de materiales tradicionales y nuevas alternativas, es la innovación en las técnicas de fabricación. Nuevas técnicas como el inyectado metálico o la impresión 3D, aplicadas a la fabricación de imanes con geometrías más eficientes, empleo optimizado de materia prima y mínima generación de residuos, están ganando fuerza trascendiendo en algunos casos la fabricación de meros prototipos [10,11].

3.2 Reciclaje de los materiales.

A pesar de la importancia crucial de los imanes permanentes basados en tierras raras, menos de un 1% se reciclan (habitualmente son fundidos junto a otros metales, perdiéndose para siempre esta materia prima de gran valor). Hay actualmente en marcha diversos proyectos europeos enfocados al reciclaje de este tipo de imanes. Un proceso de reciclaje eficiente ha de cumplir un número mínimo de requisitos:

- Bajo impacto medioambiental (los procesos de reciclaje más habituales hacen uso de ácidos que resultan en residuos altamente contaminantes).
- Coste competitivo para garantizar una rápida implementación.
- Procesado eficiente en cuanto a que el producto final permita la fabricación de nuevos imanes permanentes de calidad, con un uso mínimo de materia prima nueva a añadir al material reciclado (práctica necesaria puesto que la calidad del material obtenido después del reciclado es inferior al de la materia prima de primera generación).

Sin embargo, no solamente se trata de desarrollar procesos de reciclaje eficientes, sino de hacer posible que se implementen, para lo cual queda pendiente por desarrollar una estrategia a gran escala de recolección y separación automatizada de residuos. En la actualidad, y en las experiencias piloto de reciclado desarrolladas, la separación de los imanes se realiza de forma manual ya que los imanes se

encuentran ensamblados (unas veces atornillados, otras veces pegados o incluso embutidos en resina) y las calidades de los mismos varían según la aplicación, del fabricante e incluso, en ocasiones para un mismo fabricante, dependiendo del año de fabricación. Se hacen necesarias, por tanto, tres acciones:

- (i) Garantizar una adecuada reciclabilidad a través de un diseño inteligente de los productos que permita desarrollar un modelo de economía circular.
- (ii) Creación de un pasaporte de productos mediante una trazabilidad tanto de los materiales como de los procesos a lo largo de la cadena de valor. Existe en la actualidad una iniciativa a gran escala financiada por la UE que involucra a centros de investigación y empresas (con una fuerte participación española) en la que, además de la automatización de los procesos de reciclado, se está haciendo uso de inteligencia artificial para lograr estos objetivos en reciclaje [12].
- (iii) Promover una concienciación social de consumo responsable a través de campañas y de un establecimiento extendido de las denominadas “etiquetas verdes/sostenibles” en los productos de consumo.

3.3 Acceso seguro a los materiales necesarios para la fabricación de imanes permanentes.

Un acceso seguro se basa en primer lugar en tratar de ver qué disponibilidad de recursos y posible explotación de los mismos hay dentro de la Unión Europea. En la actualidad hay yacimientos identificados en diversos países, a destacar Estonia, Suecia, Finlandia, Grecia y España. Sin embargo, es un hecho que los largos procesos de otorgar las licencias necesarias para proceder con la explotación de yacimientos en Europa han conducido a que las inversiones en países como Canadá resulten más atractivas que en Europa.

España cuenta con yacimientos de tierras raras con mayor o menor abundancia. Entre los que presentan una mayor abundancia se encuentra el yacimiento de Matamulas (con el mineral ubicado a sólo unos pocos metros del suelo), ubicado en Castilla-La Mancha, que permanece sin explotar, al igual que grandes reservas para el futuro en Canarias. Sin embargo, la explotación de un yacimiento requiere desde su descubrimiento, como es el caso del más reciente en Suecia, de un período de entre 10-12 años. Es por ello que un nuevo descubrimiento de un yacimiento en Europa es motivo de alegría pensando en el futuro, pero investigación y desarrollo son imprescindibles para ser capaces de afrontar los enormes desafíos a los que la UE se debe enfrentar durante los próximos 10 años.

Además de los yacimientos europeos, la UE ha establecido (y continúa haciéndolo) tratados para garantizar el suministro de materias primas de terceros países, fundamentales para poder afrontar los desafíos presentes y futuros.

4. CONCLUSIONES

La Ley de las Materias Primas Críticas de la Unión Europea constituye un excelente punto de partida, que habría resultado muy bienvenido allá en el año 2010 cuando sufrimos a nivel mundial la crisis de las tierras raras, pero que sin duda ahora puede dar lugar a un punto de inflexión en la frágil situación a la que se enfrenta la UE para afrontar un desarrollo tecnológico sostenible. Son estos los puntos clave considerados en la regulación, que pueden conducir a este cambio:

- Establecer puntos de referencia para evaluar la capacidad de suministro nacional y la diversificación de la oferta.
- Desarrollo de programas nacionales para la exploración de recursos geológicos.
- Exigir a las grandes empresas que auditen sus cadenas de suministro.
- Invertir en investigación, innovación y formación de profesionales para promover tecnologías innovadoras en materias primas críticas.
- Establecer una Academia de Materias Primas para promover acciones relevantes para las cadenas de suministro de materias primas críticas.

- Mitigación de impactos ambientales, máxima consideración de los derechos laborales, derechos humanos y problemas de estabilidad regional.
- Promoción del desarrollo económico en terceros países.
- Buscar asociaciones mutuamente beneficiosas con socios comerciales fiables para fortalecer las cadenas de suministro globales.

Asimismo, la investigación y la innovación en Europa han de enfocarse en diversos frentes, todos ellos de gran importancia (no existe una solución única, sino la combinación de diversas acciones que han de actuar de manera conjunta):

- Mejorar la eficiencia de los imanes basados en tierras raras para, en un menor volumen (menor cantidad necesaria de imán permanente), alcanzar una potencia de desarrollo igual o incluso mayor que en la actualidad (y así reducir el consumo de tierras raras);
- reducir o sustituir tierras raras en los actuales imanes de Nd-Fe-B (y así de nuevo poder hacer un uso más eficiente de los materiales extraídos, ya sea proveniente de suelo europeo o de terceros países);
- garantizar procesos de reciclaje sostenibles para dar una nueva vida a los imanes de tierras raras y a estos elementos (de modo que quede garantizado un modelo circular que prevenga un agotamiento temprano de los recursos);
- desarrollar alternativas de imanes libres de tierras raras para lograr una diversificación inteligente;
- garantizar la producción de tierras raras en Europa (no todo termina en la extracción, sino que el posterior procesado es complejo si se pretende reducir el impacto medioambiental);
- preservar y aumentar la producción de imanes permanentes en Europa (y esto sólo será posible mediante la creación y la implementación de políticas de apoyo y desarrollo de nuevos procesos de fabricación que garanticen una competitividad económica con China, a la par que respetando las estrictas y adecuadas regulaciones medioambientales aplicadas en la UE).

Un futuro tecnológico verde en Europa es previsible, más lejano o cercano en el tiempo, pero cabe la pregunta de si seremos capaces de alcanzarlo de un modo sostenible.

5. REFERENCIAS

- [1] Ley Europea de las Materias Primas Críticas. Critical Raw Materials: ensuring secure and sustainable supply chains for EU's green and digital future. 2023. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_1661
- [2] Pacto Verde de la UE: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es
- [3] M. Sagawa *et al.*, Magnetic properties of rare-earth-iron-boron permanent magnet materials, *J. Appl. Phys.* 55, 2083 (1984).
- [4] J.J. Croat *et al.*, Pr-Fe and Nd-Fe-based materials: A new class of high-performance permanent magnets, *J. Appl. Phys.* 55, 2078 (1984).
- [5] Modern Permanent Magnets, J.J. Croat and J. Ormerod (eds.), Elsevier (2022).
- [6] T. Keller and I. Baker, Manganese-based permanent magnet materials, *Prog. Mater. Sci.* 124, 100872 (2022).
- [7] A. Bollero and E.M. Palmero, Recent advances in hard-ferrite magnets, in J.J. Croat and J. Ormerod (eds.) *Modern Permanent Magnets*, pp. 65-112, Elsevier (2022).
- [8] EU FP7 project “NANOPYME: Nanocrystalline Permanent Magnets Based on Hybrid Metal-Ferrites”. Duración: 2012-2015. <https://cordis.europa.eu/project/id/310516/es>
- [9] EU H2020 project “PASSENGER: Pilot Action for Securing a Sustainable European Next Generation of Efficient Rare Earth-free magnets”. Duración: 2021-2025. <https://cordis.europa.eu/project/id/101003914/es>; <https://passenger-project.eu>
- [10] J.M.D. Coey, Perspective and Prospects for Rare Earth Permanent Magnets, *Engineering* 6-2, 119 (2020).

- [11] E.M. Palmero and A. Bollero, 3D and 4D printing of functional and smart composite materials, in “Encyclopedia of Materials: Composites” – Materials Science and Materials Engineering, Vol. 2, pp. 402-419, Elsevier (2021).
- [12] Horizon Europe project “PLOOTO: Product Passport through Twinning of Circular Value Chains”. Duración: 2023-2025. <https://cordis.europa.eu/project/id/101092008>