

# Imanes y neomagnetos

James D. Livingston  
Departamento de Ciencia de Materiales e Ingeniería,  
Massachusetts Institute of Technology

## Resumen

Los imanes y las brújulas guiaron a Colón y a otros en la edad de la exploración. Hace un siglo los imanes de hierro y acero en los motores, transformadores y teléfonos impulsaron la era de la electricidad. Hoy, los imanes son mucho más potentes y más pequeños y, sin ser vistos, impulsan la nueva era de la información.

## Introducción

Los imanes sostienen listas y recados en la puerta del refrigerador, nos entretienen y asombran (a niños y adultos) por su misteriosa capacidad de atraer y repeler sin contacto alguno. Pocos, sin embargo, saben cuán grande es el número de imanes escondidos en nuestras casas y oficinas: taladros de baterías, rasuradoras, tarjetas bancarias, discos duros de computadoras, frenos antiderrapantes, etcétera. Menos personas están enteradas del extraordinario efecto tecnológico en la fuerza de los imanes.

A pesar de su importancia en la moderna tecnología carecen de la espectacularidad de otros logros, como por ejemplo, microcircuitos, rayos laser y superconductores, quizás porque las maravillas de los imanes han sido conocidas por miles de años. En su diálogo *Ion*, escrito unos 400 a.n.e., Platón pone en boca de Sócrates las siguientes palabras: “la piedra que Eurípides llama magneto no solamente atrae anillos de metal sino que también les transmite esa propiedad; en ocasiones puedes ver un gran número de anillos de hierro suspendidos uno del otro como si formaran una larga cadena, obteniendo todos los eslabones el poder de la piedra original”.

Platón había detectado dos categorías de materiales magnéticos: los permanentes y los temporales. Entre los primeros hallamos los que sostienen las notas en el refrigerador y “esa piedra que Eurípides llama magneto”, son imanes “duros” proveen un campo magnético constante. Los imanes temporales, como las puertas de los refrigeradores, están constituidos por imanes “blandos” y producen un cam-

po magnético sólo bajo la acción de un imán permanente (o por el campo producido por la corriente eléctrica de una bobina o electroimán). Aunque hay una gran variedad de imanes duros y blandos, Platón sólo conocía la piedra imán, también llamada magnetita, y el hierro.

Las piedras de magnetita se encuentran en todas las minas de hierro del mundo y contienen un óxido de hierro,  $Fe_3O_4$ ; debieron causar una gran sorpresa y asombro entre los primeros hombres por sus extraños poderes. Cuando se logró la fusión del hierro (1200 a.n.e.) y se extendió el uso del hierro probablemente se extendió el conocimiento de que éste se volvía un imán. Hasta hace unos 300 años eran los únicos materiales magnéticos conocidos.

## Las brújulas

La brújula es un objeto tan común que usualmente se considera que no guarda sorpresas. Sin embargo, cuando Einstein a los cuatro o cinco años, recibió una de su padre fue tan impresionado que lo escribió en su autobiografía: “Aún puedo recordar que esa experiencia me produjo una grande y definitiva impresión. Algo debía estar profundamente escondido detrás de las cosas”. Los científicos de hoy saben que el campo magnético que orienta a la aguja de la brújula resulta de las corrientes eléctricas del núcleo fundido de la Tierra a unos 2900 km —“algo profundamente escondido”, por cierto.

La literatura occidental generalmente omite la propiedad de los imanes de alinearse norte-sur hasta el 1200 e.c. El término inglés *lodestone* para la aguja magnética usada en navegación se formó de la palabra *lode* del inglés medieval que significa “guiar, dirigir”, el actual *to lead*, y aparece en la literatura por el 1500. Hay datos suficientes que muestran el uso de la brújula por los chinos unos 200 a.n.e., el cual era mantenido en secreto por los magos del emperador.

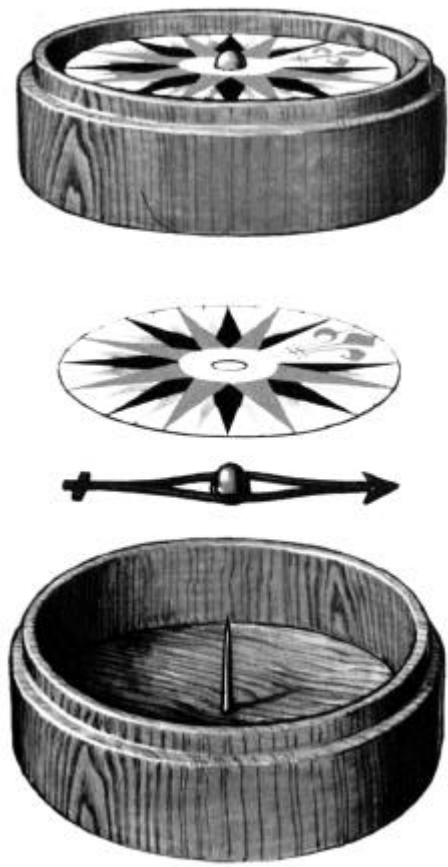
El instrumento chino era una cuchara labrada en magnetita colocada sobre una placa pulida de bronce donde podía alinearse según el campo magnético. La forma de cuchara, al parecer, representaba a la constelación de la Osa Mayor, aún utilizada para localizar la estrella Polar. Sin embargo, no hay pruebas de que los chinos usaran esta brújula cuchara como instrumento de navegación; al parecer se limitaron a la antigua práctica de la adivinación, conocida como geomancia, donde la buena fortuna depende de la correcta alineación de casas, camas y otros objetos con los objetos celestes.



Alrededor del siglo VI e.c. los chinos ya habían aprendido a usar la magnetita para magnetizar el hierro. El primer uso de las agujas magnéticas se dio, probablemente, por el año 900 e.c. en China, dos o tres siglos antes que en Europa. Las primeras agujas magnéticas no conservaban la imantación; Cristóbal Colón conocía estas limitaciones y frecuentemente remagnetizaba sus agujas con una piedra imán que “cuidaba con su propia vida” según afirma el historiador norteamericano Samuel Eliot Morison (1887–1976). Si bien la magnetita tiene propiedades permanentes, el hierro magnetizado es, en realidad, un fuerte imán temporal. Durante el siglo XVI ambos tipos de imanes, duros y blandos, fueron combinados para producir un imán permanente más poderoso que cada uno de los materiales por separado. La magnetita, con añadidos de hierro, conocido como “imán armado” era el más potente de los disponibles.

Para una comparación del poder de un imán debemos usar dos cantidades que describen las propiedades magnéticas. Una, la *saturación magnética*, representa el mayor campo magnético que puede tener el material, sea imán temporal o permanente. En términos burdos, la saturación magnética es una

medida de la fuerza del imán cuando se encuentra totalmente magnetizado; según esta propiedad el hierro es un buen imán pues su saturación magnética es del orden de 20,000 gauss en tanto que la de la magnetita es menos de 4,000 gauss. Conviene decir que hay muchas unidades para describir las propiedades magnéticas, la más familiar es el gauss; el campo magnético de la Tierra es aproximadamente medio gauss.



Otra importante propiedad de los imanes permanentes está relacionada con la intensidad del campo magnético opuesto necesario para desmagnetizarlos. Esta propiedad se denomina *coercitividad* y puede expresarse en gauss. En este caso, el material triunfante es la magnetita cuya coercitividad es casi 200 gauss, mientras que la del hierro es menos de 1. En el caso de los imanes armados la alta coercitividad de la magnetita mantiene al hierro magnetizado y la alta saturación magnética del hierro aumenta el campo magnético.

### La magia magnética

La respuesta misteriosa de la aguja magnética a la mano invisible de la Tierra inspiró muchas fantasías.

El “telégrafo simpatético”, descrito por el italiano Giambattista della Porta en su libro *Magia Naturalis* publicado en Nápoles en 1558 pretendía enviar mensajes a distancia.

Este concepto se adelantó al telégrafo de Morse, más de 300 años. El telégrafo de Della Porta consistía de dos brújulas con sus carátulas etiquetadas con letras del alfabeto. Si las dos agujas fueran imantadas con la misma piedra imán, aseguraba Della Porta, el movimiento de una aguja causaría el mismo movimiento en la otra de forma que los mensajes podrían ser enviados letra por letra; este concepto se adelantó 300 años a Samuel Morse y a la *Western Union*.

Desafortunadamente, en el siglo XVI la “magia natural” de los imanes no era suficientemente poderosa como para hacer viable tal dispositivo.



### Herraduras y héroes

La piedra imán fue, como hemos dicho, el material magnético más potente hasta los inicios del siglo XVIII, cuando comenzaron a fabricarse imanes de

acero al carbono (hierro con 1% de carbono) en Inglaterra. Los adelantos en las acerías durante los siglos XIX y XX llevaron a la producción de aleaciones de acero con tungsteno, molibdeno, cobalto, cromo y otros elementos que daban lugar a imanes más potentes. Aunque su coercitividad era menor que la de la piedra imán su saturación magnética era mucho mayor. Los ingenieros, entonces, desarrollaron una medida sencilla para la calidad de un imán, ésta dependía de la saturación magnética y de la coercitividad: el producto de energía.

En la mayoría de los casos, para cierta aplicación, el volumen de un imán era inversamente proporcional a su producto de energía. Dicho en otras palabras, mientras mayor el producto de energía, menor el tamaño del imán. Los aceros con cobalto y cromo de 1920 tenían productos de energía 4 veces mayores que los aceros al carbón y casi 10 veces el de la piedra imán.

A pesar de estos valores de producto de energía, la baja coercitividad, aproximadamente 100 gauss, obligaba a hacer los imanes muy largos a fin de disminuir el efecto desmagnetizador. Los imanes largos fueron doblados en la tradicional forma de herradura a fin de permitir que ambos polos hicieran contacto con el objeto por atraer. Hasta el desarrollo de imanes más permanentes, en 1930, el auricular del teléfono estaba separado del micrófono ya que éste estaba formado por un potente imán de herradura. Los imanes actuales raramente tienen esta forma, pero esta imagen ya se ha vuelto un estereotipo para representar campos magnéticos.

Los imanes de acero fueron superados en 1930 por los que contienen hierro, aluminio, níquel y cobalto con productos de energía y coercitividades mucho mayores que los de acero. Estos imanes de “alnico” redujeron el tamaño de los teléfonos y de muchos otros dispositivos que tuvieron un lugar importante en la Segunda Guerra; los magnetrones, capaces de general extremadamente altas frecuencias, fueron la clave del sistema de radar.

Aunque los alemanes conocieron el magnetrón al derribar un avión inglés que llevaba componentes de un radar en febrero de 1943 no pudieron reproducirlo debido al escaso suministro de cobalto y níquel. El almirante alemán Karl Dönitz afirmaba que el radar era la única arma que amenazaba al Tercer Reich; los imanes de alnico ganaron la guerra.

Después de ser un componente del radar el magnetrón pasó a la vida doméstica en el horno de microondas.

### Los mejores imanes

Los imanes de alnico aún se emplean, pero están perdiendo mercado frente a dos nuevos tipos de magnetos permanentes: los de ferrita y los de tierras raras. Los primeros están formados por óxidos de hierro, bario y estroncio; fueron introducidos en 1950 por la compañía holandesa Philips. Cercanos químicamente a la piedra imán, las ferritas tienen baja saturación magnética; en consecuencia, sus productos de energía son menores que los de los imanes de alnico.

A pesar de su debilidad, las ferritas alcanzaron casi el 90% de la producción mundial (en peso) de imanes a fines de 1990. Sus dos ventajas son la coercitividad de varios miles de gauss (los imanes de alnico tienen cientos de gauss) y el bajo costo. Su alta resistencia a la desmagnetización les permite ser delgados en la dirección de la magnetización, lo cual es una gran ventaja para el diseño de motores, bocinas y otros dispositivos electromagnéticos. Su bajo costo les permite tener, entre todos los materiales magnéticos duros, una característica más importante que el producto de energía: el precio por unidad de producto de energía. En este punto las ferritas son los mejores.

Para otras aplicaciones, donde el precio es menos relevante que las propiedades magnéticas, los mejores imanes son los más novedosos imanes de tierras raras. En tanto que el producto de energía de los imanes de alnico está limitado por la baja coercitividad, y el de las ferritas por las bajas saturaciones magnéticas, los imanes de tierras raras tienen valores mayores en ambos parámetros, lo que aumenta notablemente sus productos de energía.

Los elementos llamados tierras raras comprenden a los metales escandio, itrio, y desde el lantano hasta el lutecio. En realidad no son raros, algunos son más abundantes que el plomo y el estaño; casi siempre se les encuentra en forma de óxidos. Siendo químicamente muy similares entre sí, las tierras raras fueron, en un principio, muy difícilmente separables, por lo que no se les conseguía en alto grado de pureza ni en grandes cantidades antes de la Segunda Guerra, ocasión en que las investigaciones de la bomba atómica exigieron formas prácticas de separación.

En 1960 existían varios grupos que investigaban las propiedades de los compuestos finalmente disponibles, tierras raras con otros elementos, incluyendo el cobalto y el hierro. Los primeros imanes comerciales de tierras raras fueron producidos por *General Electric Co.*, en 1970, basados en un compuesto de cobalto y samario. Los productos de energía eran varias veces superiores a los de los imanes de alnico, además las coercitividades eran mayores a los 10,000 gauss. Su alto costo, sin embargo, limitó su uso a aplicaciones militares, por ejemplo, el radar en los aviones; también se usaron en relojes de pulsera pues la cantidad de material era tan pequeña que representaba una muy pequeña fracción del precio. Un típico reloj de cuarzo, por ejemplo, contiene un imán de tierras raras de sólo 2 ó 3 mm.

A fines de 1970 los vaivenes políticos en Zaire, hoy República Democrática del Congo, productor dominante de cobalto, aumentaron los costos y disminuyeron los suministros; ello impulsó la investigación en imanes libres de cobalto. Los resultados llevaron a una nueva generación de imanes de tierras raras en 1983, basados en un compuesto de hierro, neodimio y boro. Estos “neo” magnetos fueron desarrollados independientemente por *Sumitomo Metals* en Japón y la *General Motors Corp.* en los Estados Unidos. Los “neo” magnetos tienen saturaciones magnéticas y productos de energía superiores a los imanes de samario-cobalto y su costo es menor. El neodimio es mucho más abundante que el samario y el hierro es más abundante y menos costoso que el cobalto. Los neo magnetos rápidamente sustituyeron a los imanes de alnico y a los de samario-cobalto.



Los neo magnetos tienen productos de energía 10 veces mayores que las ferritas y más de 100 veces que los imanes de acero del siglo XIX. Con todo, debido a su bajo costo, las ferritas siguen usadas en muchos dispositivos; los neo magnetos, en cambio, por sus altos valores de producto de energía permiten la fabricación de imanes muy pequeños y su uso en diseños compactos. Debido a que el tamaño, el peso y el costo global de un dispositivo son más importantes, en general, que el costo del imán exclusivamente, los neo magnetos compiten exitosamente contra las ferritas en la mayoría de los casos.

### A escala atómica

Los físicos saben que, en rigor, toda la materia es magnética. Con un equipo suficientemente sensible se pueden medir las propiedades magnéticas del cobre, vidrio, plástico, agua e incluso de los seres vivos. En los campos magnéticos extraordinariamente grandes las fuerzas que se manifiestan en los materiales no magnéticos son sorprendentes. En 1997 un grupo holandés utilizó un potente electroimán para levitar a un sapo vivo; los investigadores han logrado levitar a una gran variedad de objetos, desde fresas hasta trozos de plástico.



Si bien la mayoría de la materia, animada o inanimada, es sólo ligeramente magnética, hay sustancias totalmente distintas. La fuerza entre la piedra imán y el hierro fue obvia a Platón sin necesidad de instrumentos de medición. Esta selectividad es uno de los aspectos más fascinantes y útiles

de las fuerzas magnéticas. Independientemente del sentido coloquial de la expresión “hallar una aguja en un pajar” la tarea es sumamente simple con un imán. Entender qué distingue al hierro y al acero de las demás sustancias obliga a pensar en escala atómica y en electrones.

Todo el magnetismo resulta del movimiento de cargas eléctricas. Un electroimán genera el campo magnético de una bobina por el movimiento de electrones en el conductor. Los electrones, sin embargo, también pueden producir magnetismo sin alejarse de sus átomos anfitriones. Tanto el movimiento orbital de los electrones alrededor del núcleo como el giro sobre su eje (*spin*) produce magnetismo, aunque en la mayoría de los sólidos la fuente principal del magnetismo es el *spin*.

La mayoría de los electrones en los átomos están apareados con electrones de spin opuesto, lo cual hace cero el magnetismo neto. En algunas sustancias los átomos poseen unos cuantos electrones con spin no apareado. El spin neto hace de cada átomo un pequeño imán, si estos magnetos atómicos apuntan al azar en todas direcciones, el material, como un todo, no presenta magnetismo. Sin embargo, para algunas sustancias particulares, los materiales ferromagnéticos, el spin neto de los átomos vecinos está alineado paralelamente debido a una fuerza denominada “intercambio de interacción”. Gracias a este alineamiento, todos los magnetos individuales actúan al unísono y crean los efectos macroscópicos magnéticos. El ferromagnetismo es un fenómeno de gran escala de cooperación interatómica, y entre los poco elementos con esta característica a temperatura ambiente está el que conocía Platón: el hierro.

Entre los elementos el hierro es muy especial por diversas razones. Se encuentra al final de la secuencia de reacciones nucleares estelares que genera a los elementos ligeros y tiene el núcleo más estable de todos los elementos. Como resultado, es el metal más abundante en el Universo y en la Tierra como un todo. Las vetas de hierro son fácilmente explotables y el metal se produce sin dificultad cuando reacciona el mineral con carbón. Estas características hacen al hierro muy barato comparado con los otros elementos magnéticos a temperatura ambiente: níquel y cobalto. Si el hierro no fuese ferromagnético y si no fuese fácil de obtener, la tecnología moderna sería muy diferente de lo que es.

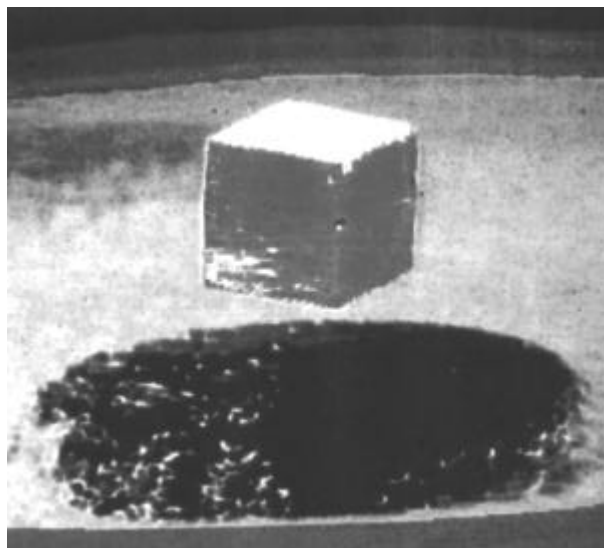
### Imanes duros, imanes blandos

En ausencia de un campo magnético externo los átomos de un material magnético blando, por ejemplo el hierro, se dividen en pequeñas regiones de magnetización llamados “dominios magnéticos”. Cada dominio está completamente magnetizado, todos sus átomos magnéticos están alineados en paralelo, pero la dirección de magnetización varía de un dominio a otro. Los dominios se cancelan macroscópicamente. En algunos materiales los dominios llegan a la escala de milímetros, pero aún siendo mucho menores, cada dominio contiene miles de millones de magnetos atómicos alineados en una dirección.

Cuando se coloca un imán en la puerta de un refrigerador las condiciones de la lámina cambian localmente. Cada magneto atómico, como una pequeña brújula, intenta alinearse con el campo externo; como resultado algunos dominios crecen y otros se reducen. Si el polo sur del imán está sobre la lámina, los dominios que crecerán serán los que tengan cerca el polo norte del imán. A medida que los dominios aumentan y disminuyen, ocurren cambios en sus fronteras. En un material magnético blando los dominios se mueven fácilmente y, en consecuencia, la magnetización macroscópica cambia fácilmente. Esto es particularmente importante para equipos que usan corriente alterna, CA, en la cual el flujo de carga eléctrica y del campo magnético se invierten periódicamente. Dentro del núcleo de hierro de un transformador de potencia, por ejemplo, la estructura del dominio magnético debe invertirse 120 veces en un segundo como respuesta a las variaciones en el embobinado primario. De forma semejante, la estructura del dominio en la cabeza de grabación de un equipo de video o de audio, o de una computadora, debe cambiar miles de veces en un segundo.

El comportamiento ideal para un material magnético duro es justamente lo opuesto. Para retener su magnetismo, las fronteras de los dominios deben modificarse con gran dificultad. Una vez que se ha magnetizado en una dirección, el material debe requerir un gran campo en dirección opuesta para mover sus dominios magnéticos y perder sus propiedades; es lo que hemos llamado una gran coercitividad.

De lo anterior queda claro que para los investigadores desarrollar “los mejores imanes” responde a muy diferentes puntos de vista. La saturación magnética se obtiene cuando todos los dominios magnéticos están alineados; depende, por tanto, de las características de los magnetos atómicos y del grado de interacción de intercambio que los alinea. Esto, a su vez, depende de la composición química del material y de la estructura cristalina. Por ejemplo, la saturación magnética de las ferritas es baja, en parte, porque contienen átomos de oxígeno no magnéticos que, obvio, no contribuyen como magnetos atómicos. También es baja porque las interacciones de intercambio en las ferritas lleva a arreglos antiparalelos debido a la estructura cristalina.

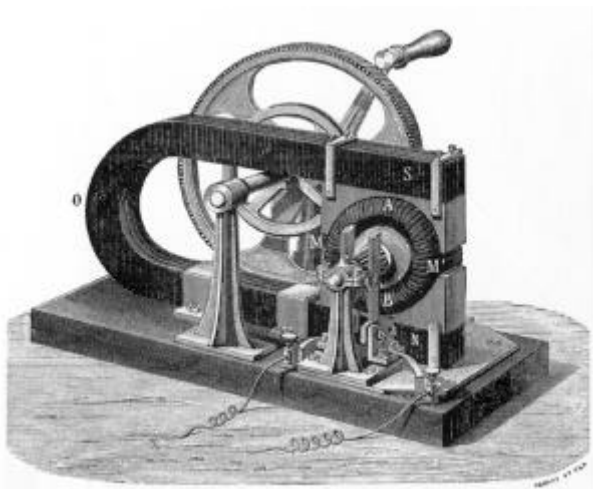


Por otro lado, la coercitividad depende de la facilidad con la que los magnetos atómicos pueden cambiar su dirección en presencia de un campo externo y, por tanto, de la facilidad con que pueden moverse los dominios magnéticos. La coercitividad es muy sensible a la homogeneidad de la microestructura, al tamaño de los cristales individuales, la uniformidad de la constitución química y la presencia de partículas de otros compuestos.

El microscopio electrónico ha revelado la razón de la alta coercitividad de la piedra imán: la presencia de pequeñas partículas de diversos óxidos de hierro que bloquean el movimiento de los dominios magnéticos. En el laboratorio se han producido muestras de magnetita pura que, por lo anterior, no son imanes permanentes, tienen muy baja o nula coercitividad. Así, la creación de barreras microscópicas para la formación y el movimien-

to de los dominios es la estrategia que siguen los científicos para mejorar la coercitividad en los nuevos imanes.

La coercitividad también está influida por un factor a nivel atómico llamado *anisotropía magnetocrystalina*. En los átomos de las tierras raras, por ejemplo, el samario y el neodimio, la distribución de los electrones alrededor de los núcleos está lejos de ser esférica, lo cual propicia una orientación particular de los átomos según la red cristalina, así como es más fácil rodar un balón que una moneda. La gran anisotropía magnetocrystalina de los átomos de tierras raras inmoviliza las fronteras de los dominios en los imanes de samario-cobalto y los neomagnetos, a lo cual ayudan las heterogeneidades químicas y estructurales. En los imanes de tierras raras los átomos de hierro y cobalto son la principal fuente de magnetización y los átomos de las tierras raras son la principal fuente de la coercitividad.

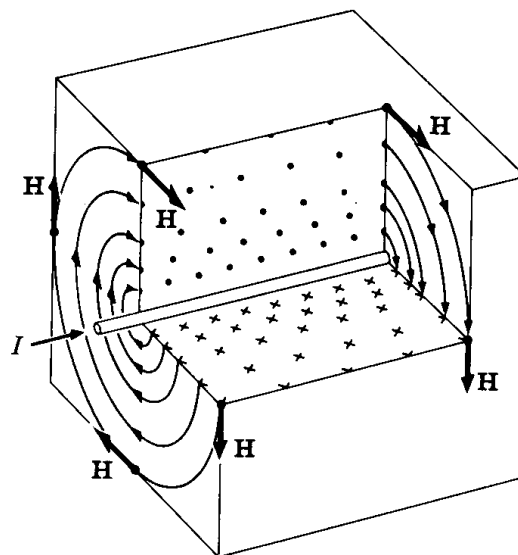


Por otro lado, los científicos interesados en los materiales magnéticos blandos buscan disminuir la coercitividad. Esto significa que intentan producir materiales con microestructuras homogéneas y bajas anisotropías magnetocrystalinas, así como facilitar el movimiento de las fronteras de los dominios y el cambio de magnetización. Un resultado de esta investigación ha sido el desarrollo comercial de aleaciones amorfas o no cristalinas, con muchas aplicaciones de CA en cabezas de grabación y núcleos de transformadores. Puesto que los materiales amorfos carecen de celdas cristalinas es posible el movimiento de las fronteras de los dominios.

### Motores y bocinas

Los extraordinarios logros en los materiales magnéticos duros desde 1930 han aumentado la importancia tecnológica de los imanes permanentes. Unas de las aplicaciones más importantes están en los motores y en las bocinas; literalmente, los imanes mueven y sacuden a la moderna tecnología. Los neomagnetos tienen mayor impacto en los motores constituidos básicamente de un rotor, el imán, girando dentro del estator debido a las fuerzas magnéticas entre ellos. Hace muchos años los imanes de los motores eran electroimanes con núcleo de hierro, pero el exitoso desarrollo de los imanes de alnico, de ferritas y de tierras raras ha aumentado el porcentaje de motores que usan imanes permanentes en el rotor y en el estator. Para una capacidad dada, un motor de imanes permanentes puede ser mucho más pequeño y ligero que uno de electroimanes, además de que es más eficiente en términos energéticos pues no hay pérdidas por la resistencia eléctrica de los embobinados.

Al aumentar los productos de energía se ha logrado disminuir mucho el tamaño de los imanes, aumentar las coercitividades ha eliminado limitaciones de diseño que, como la forma de herradura, eran necesarias para evitar la desmagnetización. Si en un inicio los motores eran de baja potencia, los neomagnetos permiten hoy motores de 1,000 HP con un peso y tamaño del 20% de los motores tradicionales.



Independientemente de la potencia, la ingeniería encuentra una gran flexibilidad para el diseño de los motores. Como señalamos, los primeros motores usaban estatores de imán permanente y electroimanes en el rotor. Hoy, las características de los neomagnetos hacen posible diseños con rotores de imanes permanente. Estos motores tienen mejor control pues es más simple alimentar señales eléctricas a un estator que a un rotor que gira rápidamente. Una aplicación de este tipo de motores sin escobillas son los motores de los tocacintas de cassette. Otro diseño facilitado por los neomagnetos está en los motores de las unidades de disco de las computadoras; sean discos duros, discos CD o "floppies", las limitaciones de espacio obligan a motores sumamente delgados. En los motores de los discos el campo magnético principal está dirigido con el eje de rotación más que radialmente, diseño que requiere materiales magnéticos duros con alta coercitividad.

Un desarrollo semejante se ha dado en las bocinas, las cuales pueden ser ahora mucho más compactas. En la mayoría de las bocinas un imán permanente produce fuerzas vibratorias sobre una bobina cuya corriente eléctrica cambia rápidamente en correspondencia con los sonidos reproducidos. La bobina está colocada en un diafragma que transfiere las vibraciones al aire cercano.

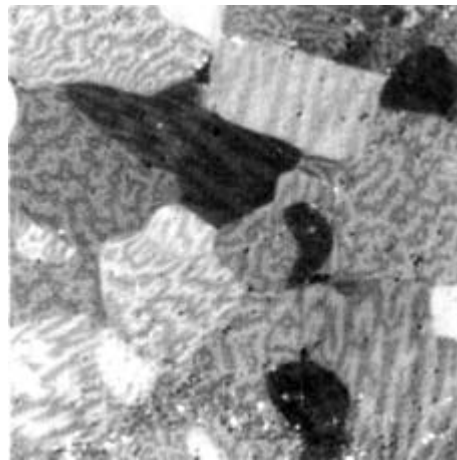
Cuando los imanes de alnico y de ferrita desplazaron a los imanes de herradura se pudieron fabricar los teléfonos con el receptor y transmisor en una misma pieza. Más recientemente, los imanes de tierras raras han permitido fabricar audífonos de alta calidad y potencia utilizados en los *walk-man*, *disc-man* y aparatos para sordos.

En el automóvil moderno hay docenas de componentes que usan neomagnetos. Además de las bocinas y los motores, hay muchos sensores que usan imanes, por ejemplo, los que miden la velocidad de rotación de ejes y ruedas y activan los sistemas de freno antiderrapante. En estos sensores un pequeño imán está sujeto al eje y provoca un pulso eléctrico cada vez que pasa cerca de una bobina estacionaria u otro dispositivo. Los imanes son una parte fundamental en las bolsas de seguridad; la gran desaceleración producida por el choque mueve un imán en una bobina y dispara el mecanismo de inflado de las bolsas.

Tanto las computadoras, como las impresoras, los sistemas de control industrial y seguridad doméstica y cientos de dispositivos aprovechan la fuerza impulsora de minúsculos imanes.

En el extremo opuesto de la escala hay una creciente aplicación que demanda toneladas de imanes permanentes: la imaginología de resonancia magnética, MRI. Esta técnica de diagnóstico médico no invasivo usa fuertes campos magnéticos que actúan sobre los núcleos de hidrógeno generando imágenes de las estructuras internas del cuerpo. En general, mientras más fuerte el campo, más definida la imagen. Aunque la mayoría de los sistemas MRI usan electroimanes superconductores, los imanes permanentes tienen el atractivo de no requerir el voluminoso y costoso sistema de enfriamiento del embobinado para llegar al estado de superconducción. Un sistema MRI de 2,000 gauss requiere 21 toneladas de ferrita pero sólo 2.6 de neomagnetos; aunque el costo favorece a la ferrita, la importancia del tamaño y el peso favorece a los MRI de neomagnetos con campos de 2,000 gauss o más.

La tecnología moderna está en deuda con los materiales magnéticos blandos que reducen las pérdidas de energía en los transformadores y otros equipos de CA. Particularmente notable es el avance logrado en los materiales de grabación, lo que ha mejorado por un factor de 10,000 la capacidad de almacenamiento de datos en discos de alta densidad en menos de 40 años. A pesar del avance de los discos ópticos, la mayoría de los datos son almacenados aún en medios magnéticos.



### Más allá de los neomagnetos

Incluso los mejores imanes actuales tienen limitaciones; los neomagnetos, por ejemplo, tienen muy ba-



ja resistencia a la corrosión, su eficiencia disminuye con el aumento de temperatura y su costo es relativamente alto. Hay muchos equipos de investigación que buscan resolver estos problemas y otros más que buscan nuevos y mejores materiales. El conocimiento actual de la física de los imanes considera posible productos de energía dos o tres veces superiores a los que tienen los neomagnetos. Aunque lo anterior es relevante, también lo es el desarrollo de imanes duros superiores a las ferritas pero menos costosos que los neomagnetos. Ambas vías son muy prometedoras puesto que hay una gran cantidad de compuestos cuyas propiedades magnéticas son completamente desconocidas.

Los investigadores han medido las propiedades básicas de la mayoría de los compuestos binarios y han continuado con la mayoría de las aleaciones simples; entre estos éxitos se encuentran los imanes de alnico. Sin embargo, aun restan miles de millones de compuestos ternarios y cuaternarios sin estudiar. Como ejemplo refiramos que fue sólo cuando los científicos se enfocaron en ciertos compuestos ternarios que descubrieron los imanes de hierro–neodimio–boro.

Las más recientes investigaciones se han concentrado en compuestos de tierras raras con hierro o cobalto y un tercer elemento metaloide, nitrógeno, carbono o boro. Por ejemplo, un imán compuesto de hierro, samario y nitrógeno estudiado en el *Trinity College* de Dublin, en 1990, muestra propiedades magnéticas semejantes a las de los neomagnetos pero con la ventaja de operar a alta temperatura. Algunos científicos investigan los compuestos de hierro o cobalto con dos o más metaloides a fin de cubrir el hueco entre las ferritas baratas y los costosos neomagnetos.

Los últimos años se ha hecho un gran esfuerzo en la comunidad científica por hallar el Santo Grial de la ciencia de materiales: un superconductor a temperatura ambiente capaz de llevar una gran corriente.

Un electroimán hecho de tal material, una vez energizado con la corriente de electrones, mantendría su campo magnético con un mínimo suministro externo de energía.

Por otro lado, es alentador saber que, en cierto sentido, la tecnología ya cuenta con tal dispositivo — el imán permanente— cuyo campo persiste gracias al movimiento libre de resistencia de los electrones, aunque, cierto, ocurre a nivel atómico.

La historia de los imanes permanentes ha sido de continua mejoría, lo cual invita a pensar que existen aun mejores materiales esperando ser descubiertos por quienes mantengan el esfuerzo.

#### Lecturas recomendadas

*Advances in permanent magnetism*. Roland J. Parker. Wiley, 1990.

*Driving force: the natural magic of magnets*. James D. Livingstone. Harvard University Press, 1996.

*Hidden attraction: the mystery and history of magnetism*. Gerrit L. Verschuur. Oxford University Press, 1993.

*Rare-earth Iron permanent magnets*. J. M. D. Coey, ed. Oxford University Press, 1996.