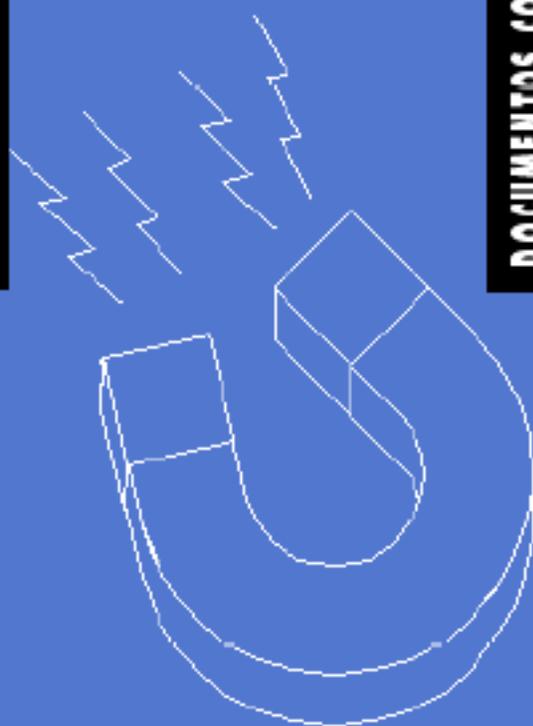
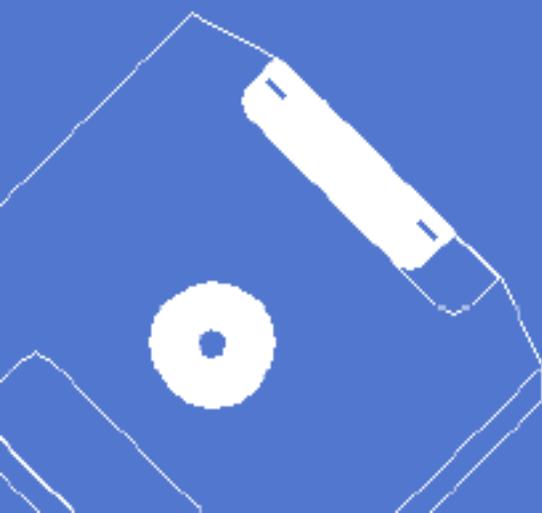


**19**

**MATERIALES  
MAGNÉTICOS**



**19**

**MATERIALES  
MAGNÉTICOS**

**DOCUMENTOS  
COTEC SOBRE  
OPORTUNIDADES  
TECNOLÓGICAS**

Primera edición:  
Marzo 2003

Depósito legal: M. 8708-2003

Imprime:  
Gráficas Arias Montano, S.A.

# ÍNDICE

<b>Presentación</b> .....	5
<b>1. Introducción</b> .....	9
1.1. Presentación de objetivos .....	10
1.2. Algunas definiciones magnéticas .....	12
1.3. Propiedades magnéticas extremas y aplica- bilidad tecnológica .....	16
<b>2. Grandes líneas de tecnología magnética y sus ten- dencias innovadoras: Identificación de materiales por sus aplicaciones tecnológicas</b> .....	19
2.1. Clasificación de los materiales magnéticos atendiendo a sus aplicaciones .....	19
2.2. Núcleos de máquinas electromagnéticas ...	22
2.2.1. Núcleos de grandes transformado- res: Aceros al silicio .....	25
2.2.2. Núcleos y piezas en pequeños trans- formadores y motores: <i>Permalloys</i> y otras aleaciones .....	26
2.2.3. Componentes electrónicos: Ferritas blandas .....	27
2.2.4. Las últimas tendencias: Aleaciones amorfas y nanocristalinas .....	29
2.3. Imanes permanentes .....	30
2.4. Grabación magnética: Medios, escritura y lectura .....	37
2.5. Automatización: Sensores, relés y actuado- res magnéticos .....	46
2.6. Otras aplicaciones: Biomagnetismo y geo- magnetismo, altas frecuencias .....	52
2.6.1 Biomagnetismo .....	52

2.6.2. Geomagnetismo .....	54
2.6.3. Altas frecuencias y otras aplicaciones .....	54
2.7. Las últimas tendencias. Nanotecnologías: Materiales y técnicas de procesado y de medida .....	55
2.7.1. Últimos materiales magnéticos y tendencias de futuro .....	55
2.7.2. Nuevas técnicas de observación y medición a escala nanométrica .....	57
<b>3. Capacidad tecnológica de I+D en España: Situación actual y perspectivas .....</b>	<b>59</b>
3.1. Aspectos en el desarrollo tecnológico .....	59
3.2. Panorama científico tecnológico actual .....	61
3.3. Identificación de los centros de actividad investigadora .....	71
3.4. Identificación de centros tecnológicos e industrias .....	86
3.5. Identificación de capacidades .....	98
3.6. Objetivos razonables .....	99
3.7. Algunas perspectivas generales.....	104

## **PRESENTACIÓN**

La Fundación Cotec para la Innovación Tecnológica mantiene, desde hace más de diez años, como una de sus actividades permanentes la búsqueda e identificación de oportunidades tecnológicas que permitan al tejido empresarial y social español incrementar su bagaje técnico, su capacidad y su competitividad.

Los Documentos Cotec sobre Oportunidades Tecnológicas conforman una colección orientada al cumplimiento del objetivo estratégico de actuar como motor de sensibilización a la actitud innovadora, tanto en los ámbitos empresarial y académico, como en la sociedad en general. Estos documentos se editan después de un proceso de debate que tiene lugar en sesiones de identificación de las oportunidades que ofrece una determinada tecnología o un grupo de tecnologías.

Estas sesiones tienen como finalidad conocer los retos y oportunidades de las tecnologías analizadas, así como las principales líneas de I+D e infraestructuras que permitan facilitar la transferencia a la industria y a los servicios. En ellas la Fundación Cotec reúne a un cualificado grupo de expertos empresariales y de investigadores de la universidad y de centros de I+D, para que analicen las posibilidades de aplicación de esas tecnologías y las oportunidades que ofrecen para los distintos sectores.

La preocupación de Cotec por el área de los materiales es evidente, por cuanto dentro de la colección de Necesidades Tecnológicas editó el documento n.º 3 sobre *Materiales de automoción* y, en esta misma colección de Oportunidades tecnológicas, el n.º 6 versó sobre *Tuberías de polietileno* y, más recientemente, el n.º 15 sobre *Materiales innovadores. Superconductores y materiales de recubrimiento*.

En esta ocasión, la Fundación Cotec presenta el resultado de la sesión dedicada a los **Materiales Magnéticos**, que tuvo lugar en Madrid el día 16 de octubre de 2002, en la sede de Cotec. El documento facilita una introducción amplia sobre los materiales magnéticos, pero se detiene con más profundidad en la identificación de los materiales para distintas aplicaciones. La capacidad tecnológica en España se analiza de forma exhaustiva.

La sesión contó con la colaboración de un equipo de investigadores, de expertos empresariales y de representantes de la Administración, coordinados por el profesor Manuel Vázquez, que preparó y coordinó el material de esta publicación.

La Fundación Cotec quiere dejar constancia de su agradecimiento a Manuel Vázquez y a los demás participantes en la sesión, sin cuyos comentarios y sugerencias este documento no hubiera sido posible.

## **Participantes en la sesión Cotec sobre "Materiales magnéticos"**

- José Manuel Barandiarán  
Universidad del País Vasco
- Antonio Bas  
Ames
- Carlos Bosch  
Dragados, Obras y Proyectos
- Agustín del Moral  
Universidad de Zaragoza
- Elena Guijarro  
CDTI
- Antonio Hernando  
Instituto de Magnetismo Aplicado, UCM-RENFE
- Eloísa López  
Universidad Complutense de Madrid
- Carmen Mijangos  
Ministerio de Ciencia y Tecnología
- Manuel Poza  
Fundación Cotec
- José Rivas  
Universidad de Santiago de Compostela
- Marta San Román  
Hispano Ferritas

- Juan Carlos Serna  
Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, CSIC
- Javier Tejada  
Universidad de Barcelona
- Manuel Zahera  
Fundación Cotec

**Coordinador:**

- Manuel Vázquez  
Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, CSIC



## **INTRODUCCIÓN**

Tarjetas de crédito o billetes de transporte, discos duros y flexibles en ordenadores, todo tipo de transformador o motor, imanes (en todo vehículo se dispone de al menos veinte imanes distintos), sensores para la navegación de satélites artificiales de comunicación, etc.

Después de una breve reflexión, a nadie se le puede escapar la importancia, las implicaciones económicas o la variedad de aspectos, tanto en la vida cotidiana como en aspectos más sofisticados, en donde se emplean materiales que presentan determinadas propiedades "magnéticas".

Pero ¿qué entendemos por material magnético?, ¿en dónde se emplean?, ¿en qué propiedades magnéticas se basan sus aplicaciones?, ¿hasta qué punto son estas aplicaciones tan relevantes? A la respuesta de estas y otras cuestiones nos referiremos a continuación.

Asimismo analizaremos las repercusiones de esas tecnologías en nuestro ámbito más cercano, las capacidades presentes de los centros de investigación y de la empresa, y sus posibilidades de desarrollo e innovación.

## 1.1. PRESENTACIÓN DE OBJETIVOS

La utilidad de los materiales magnéticos es ciertamente muy amplia y de particular trascendencia económica por el volumen de material utilizado y su coste de producción; también lo es desde un punto de vista social por las implicaciones en las mejoras de la calidad de vida. El objetivo perseguido con este documento es doble: primero se presenta una revisión de los diferentes tipos de materiales magnéticos que son de utilidad tecnológica y, después, se realiza una aproximación a la capacidad tecnológica que se posee actualmente en España, así como a sus perspectivas de futuro.

La aplicabilidad de los materiales se basa primordialmente en dos fenómenos:

- 1) La perturbación que algunos materiales magnéticos generan en su entorno (descrita a partir del *campo magnético* generado).
- 2) La respuesta ante un campo magnético exterior (que se expresa, por ejemplo, a través de su *imantación*, o su susceptibilidad o *permeabilidad* magnética). Así, cabe hablar de **materiales magnéticos duros**, o simplemente imanes o imanes permanentes, debido al intenso campo magnético generado por ellos, y de **materiales magnéticos blandos** o dulces, caracterizados por su elevada susceptibilidad magnética. Desde un punto de vista estrictamente comercial, el mercado mundial se reparte aproximadamente en partes iguales entre los materiales duros y los materiales dulces.

Los materiales magnéticos han contribuido intensamente al desarrollo de diversas tecnologías. Así por ejemplo, es de particular relevancia su contribución a dos "revoluciones" tecnológicas: la primera se inició hace algo más de un siglo, derivada de la posibilidad de la conversión de *diferentes tipos de energía en energía eléctrica con elevado rendimiento, utilizando hierro dulce (transformadores)* y, la se-

gunda, más cercana en el tiempo, la *tecnología de la información* basada en la "memoria" magnética. Estos son dos casos particularmente evidentes en los que el descubrimiento y/o la innovación de materiales magnéticos han generado, a través de pasos tecnológicos intermedios, avances discontinuos en la calidad y forma de vida cotidiana insospechados en los primeros momentos de su desarrollo científico-tecnológico.

En este documento, en primer lugar, y para facilitar la comprensión de los aspectos considerados posteriormente, se presenta este capítulo de introducción donde, después de repasar algunas definiciones "magnéticas", se discuten los distintos factores que determinan las posibilidades tecnológicas de un material magnético, que por tanto permitirán el "diseño" de los materiales de interés. Esos factores son fundamentalmente:

- la composición que determina las características magnéticas intrínsecas, y
- el procesado estructural y la definición de la forma geométrica que permiten modificar el comportamiento magnético macroscópico.

En el segundo capítulo se repasan las distintas tecnologías que utilizan materiales magnéticos, examinando en cada caso cuáles son las tendencias y las previsiones, a escala mundial, relativas a los materiales magnéticos avanzados en un futuro próximo.

En el capítulo tercero se analizan aspectos relativos a la capacidad tecnológica actual en España y sus perspectivas. Se ha realizado una prospección de los centros y empresas que de alguna manera están involucradas en la tecnología en materiales magnéticos. Asimismo, se consideran las expectativas de innovación de la tecnología propia que caben esperar a corto y medio plazo. Este último apartado parece de la mayor relevancia, especialmente si se tiene en cuenta la potencialidad tecnológico-científica existente en la actualidad.

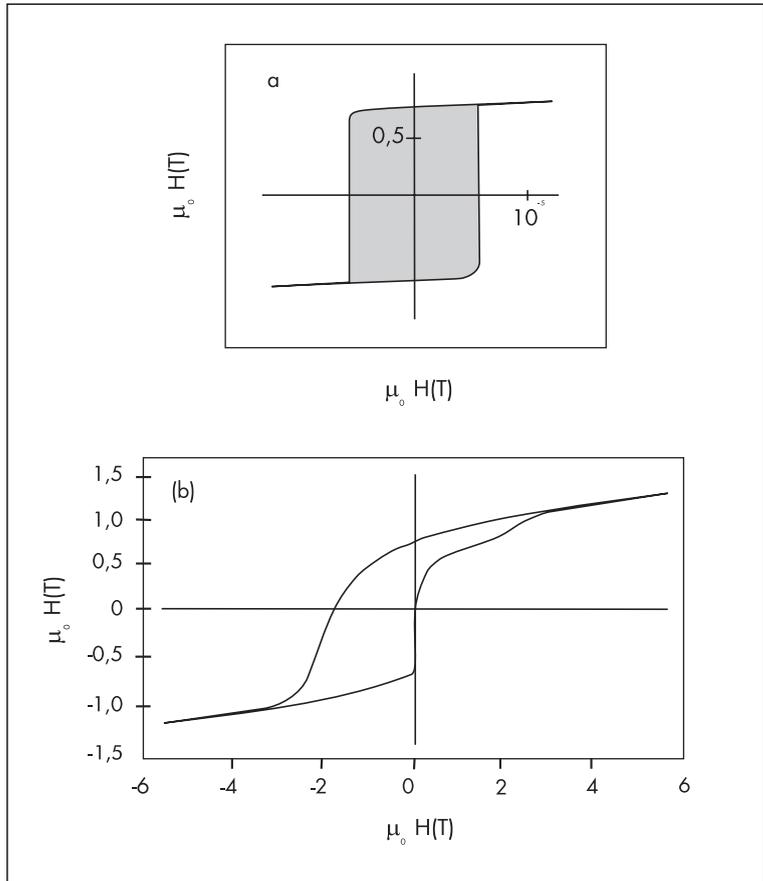
## 1.2. ALGUNAS DEFINICIONES MAGNÉTICAS

Se entiende que en una región del espacio existe un *campo magnético* cuando, al colocar en ella un material magnético, éste sufre fuerzas que tratan de modificar su posición espacial. Un campo magnético puede ser generado mediante una *corriente eléctrica* o bien por un *imán*.

Por su parte, un material magnético está constituido por momentos magnéticos elementales (originados por sus electrones), que se acoplan mediante la denominada interacción de canje, cuyo origen se explica mediante la física cuántica, dando así lugar a un momento magnético neto, que por unidad de volumen se denomina imantación —también se emplean los términos *imanación* y *magnetización*—. Un material es tanto más magnético —y, por tanto, de mayor potencialidad para su utilización tecnológica— cuanto mayor sea su imantación. Los mejores ejemplos son el hierro, el cobalto y el níquel, así como sus aleaciones.

En ausencia de campo magnético aplicado, el material se puede encontrar en *estado desimantado*, es decir, se subdivide espontáneamente en regiones o *dominios*, en cada uno de los cuales la imantación sigue una orientación particular, dando lugar a un valor macroscópico compensado o nulo. Al actuar un campo magnético, se origina el *proceso de imanación*, según el cual la imantación macroscópica neta aumenta proporcionalmente al valor de dicho campo magnético (véase la figura 1). Cuando el campo magnético varía en el tiempo de forma cíclica, obtenemos un *ciclo de histéresis*.

En esta figura hemos representado los parámetros magnéticos típicos de un ciclo de histéresis. Estos parámetros son: la *imantación de saturación* ( $M_s$ ), que se alcanza para un campo magnético suficientemente elevado; la *remanencia* o *imantación remanente* ( $M_r$ ), imantación que permanece una vez anulado el campo aplicado; y el *campo coercitivo* ( $H_c$ ), o campo magnético que es necesario aplicar para anular la imantación. El área encerrada den-



**Figura 1**

Ciclos de histéresis de un material magnético blando (hilo amorfo) (a), y de un imán permanente de la familia del NdFeB (b). Obsérvese la diferencia de los campos coercitivos de ambos ciclos y la similitud de los valores de saturación de la imantación.

tro de un ciclo de histéresis corresponde a las *pérdidas magnéticas*, y es proporcional a la energía gastada en el proceso cíclico debido a la irreversibilidad del proceso de imantación. Se entiende por *susceptibilidad magnética* ( $\chi$ ) la variación de imantación cuando se incrementa

el campo aplicado, y es por tanto variable en las distintas zonas del ciclo de histéresis. Así, se habla de susceptibilidad inicial o susceptibilidad máxima, respectivamente, para campos magnéticos aplicados muy débiles o bien campos próximos al campo coercitivo cuando la variación de imantación es máxima.<sup>1</sup>

En la parte superior de la figura se observa un ciclo de histéresis de un material magnético blando, mientras que la parte derecha representa el ciclo de histéresis característico de un imán permanente a partir del estado desimanado. Es de hacer notar que la principal diferencia entre ambos ciclos radica en su campo coercitivo —*¡unos siete órdenes de magnitud!*—, mientras que otras características como remanencia o imantación de saturación difieren relativamente poco. También es importante resaltar que el ciclo de histéresis y sus parámetros característicos varían con la temperatura de medida. En particular, por encima de una cierta temperatura de trabajo denominada temperatura de orden o temperatura de Curie, la antes citada interacción de canje se anula y, con ella, desaparece el ciclo de histéresis, perdiéndose todas las demás propiedades magnéticas tecnológicas.

Además de estar determinadas por la intensidad del momento magnético neto y la interacción de canje, que determinan esencialmente la imantación de saturación y la temperatura de Curie, las características técnico-magnéticas de un material lo están por su *anisotropía magnética*. Un material será magnéticamente tanto más duro cuanto mayor sea su anisotropía magnética total. Existen tres tipos fundamentales de anisotropía:

---

<sup>1</sup> La inducción magnética (B) representa la suma de campo magnético (H), y de imantación (M), a través de la expresión  $B = \mu_0(H+M)$ , siendo  $\mu_0$  la permeabilidad del vacío. La permeabilidad de un material magnético ( $\mu$ ) está relacionada con su susceptibilidad ( $\chi$ ), a través de la expresión  $\mu = \mu_0(1+\chi)$ , donde  $\chi = M/H$ .

- 1) La anisotropía *magnetocristalina* está originada por el particular ordenamiento geométrico de los átomos que constituyen el material, de modo que la respuesta magnética, medida a través de la imantación, depende de la dirección en que se aplique el campo magnético. Los materiales cristalinos, en donde el ordenamiento de sus átomos es de largo alcance —el tamaño de grano cristalino es del orden de micras o superior—, las redes cristalinas más comunes poseen simetría cúbica o hexagonal. Por el contrario, los materiales amorfos se definen precisamente a partir de su desorden atómico o ausencia de orden cristalográfico, más allá de unas pocas distancias atómicas. Por último, en las denominadas aleaciones nanocristalinas, cuyos cristales tienen dimensiones nanométricas (del orden de centésimas de micra), la anisotropía magnetocristalina se promedia macroscópicamente dando lugar a una anisotropía efectiva casi nula.<sup>2</sup>
- 2) La anisotropía *magnetoelástica* aparece como consecuencia de que el material esté sometido a tensiones mecánicas. Esas tensiones, al modificar ligeramente las posiciones relativas de los átomos, inducen una cierta anisotropía, de modo que la imantación se orienta según direcciones preferentes determinadas por aquellas tensiones. Inversamente, al imantarse un material bajo la acción de un campo magnético, se produce simultáneamente una modificación de sus dimensiones. De este modo, se define la constante de *magnetostricción* ( $\lambda$ ) a partir de la variación relativa de sus dimensiones.<sup>3</sup>

---

<sup>2</sup> Recordar que la distancia entre átomos es típicamente de unos pocos Angstrom, unidad que equivale a una diezmilésima de micra.

<sup>3</sup> La constante de magnetostricción es un parámetro muy importante a la hora de determinar el carácter magnético dulce o duro de un material. Así,  $\lambda$  es del orden de  $10^{-7}$  en los materiales más dulces; y, por ejemplo, una varilla de 1 m de longitud sufrirá un alargamiento del orden de una décima de micra durante el proceso de imantación. En los materiales más duros,  $\lambda$  es del orden de  $10^{-3}$ .

- 3) La anisotropía *de forma* surge como consecuencia de la forma geométrica del material o de las partículas que lo constituyen. Así, en un material con forma alargada (por ejemplo, una aguja), la imantación tratará de disponerse paralela a su eje principal, mientras que en un material bidimensional (un disco o una cinta), la imantación preferirá disponerse en el plano. Cuando se aplica un campo magnético según una dirección no preferente, la imantación del material responde con la generación de un campo magnético interno o desimanador ( $H_{des}$ ), que se opone al proceso de imantación.<sup>4</sup>

### 1.3. PROPIEDADES MAGNÉTICAS EXTREMAS Y APLICABILIDAD TECNOLÓGICA

Un material tecnológico avanzado debe presentar preferentemente un carácter extremo en alguna de sus propiedades magnéticas. Cada aplicación particular está relacionada con el carácter extremo de una propiedad o característica determinada.

Así, dos magnitudes que en principio deben ser lo más elevadas posible en todo material magnético tecnológico son la imantación de saturación y la temperatura crítica de orden. La primera de ellas determina la intensidad de la respuesta ante una excitación magnética y, la segunda, el rango de temperatura de trabajo del material y su estabilidad térmica.

Particularizando, como materiales dulces más adecuados, por ejemplo para chapa de transformador habrá que emplear, por definición, aquellos que presenten mínimas pérdi-

---

<sup>4</sup> El campo desimanador se expresa como  $H_{des} = NM_s$ , donde el factor desimanador (N) depende de las dimensiones concretas de cada material.

das por histéresis, mínimo campo coercitivo y máxima remanencia. Cuando se requiera elevada respuesta relativa ante débiles excitaciones se emplearán materiales con alta susceptibilidad inicial y baja remanencia.

Como imanes permanentes, es decir, materiales con elevada capacidad de crear campos magnéticos en su entorno, se requerirá máximos valores de remanencia y del campo coercitivo, lo que determina un máximo valor del llamado producto de energía.

En muchos componentes electrónicos, cuando se requiere una respuesta elevada ante excitaciones magnéticas que varíen muy rápidamente con el tiempo (alta frecuencia), se emplearán materiales con mínimas corrientes parásitas o inducidas. Esto requiere una permeabilidad suficientemente elevada y una alta resistividad. Pero si la respuesta debe ser muy estable en el tiempo, entonces los fenómenos de relajación y de desacomodación o viscosidad magnética deben ser mínimos.

Cuando se pretende almacenar magnéticamente una información (grabación magnética), se deben emplear materiales que posean alta coercitividad para que el estado magnético no sea borrado ante excitaciones magnéticas indeseadas, aunque tampoco debe ser excesivamente extrema, para no dificultar así los propios procesos de grabación y lectura de esa información. En este caso podríamos hablar de materiales semiduros como los más adecuados para ser el medio de grabación magnética.



# 2

## **GRANDES LÍNEAS DE TECNOLOGÍA MAGNÉTICA Y SUS TENDENCIAS INNOVADORAS:**

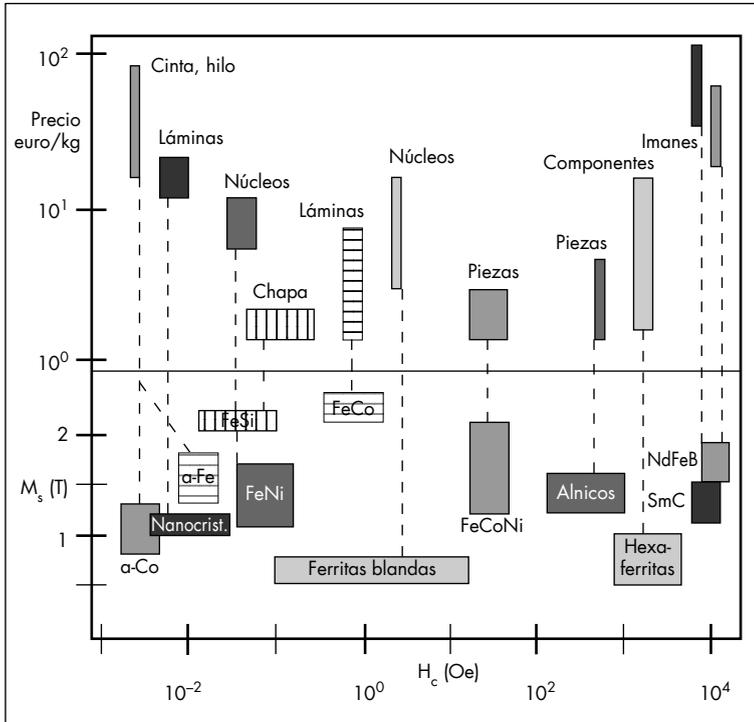
### **IDENTIFICACIÓN DE MATERIALES POR SUS APLICACIONES TECNOLÓGICAS**

#### **2.1. CLASIFICACIÓN DE MATERIALES MAGNÉTICOS ATENDIENDO A SUS APLICACIONES**

En este capítulo se describen los distintos materiales magnéticos según las diferentes tecnologías en las que son empleados. Como se ha mencionado antes, hay en principio dos factores que determinan la aplicabilidad de un material: su calidad magnética y el precio que representa su introducción en el mercado. Así pues, no en todas las aplicaciones se emplearán los materiales de mejores prestaciones magnéticas, ni siempre los materiales más baratos.

Para comenzar y poder hacernos una idea global de todas las familias de materiales magnéticos y, al mismo tiempo, del factor económico, se presenta en la figura 2 el precio estimado de las diversas familias de materiales dulces y du-

ros, así como su correlación con una medida de una calidad magnética específica, como es el campo coercitivo, el cual, como ya se ha indicado, puede variar en muchos órdenes de magnitud. En general, se puede apreciar que los materiales que se encuentran en la zona media de coercitividad son los más baratos, mientras que aquellos situados en los extremos de coercitividad son los más costosos. Esto implica un primer compromiso entre precio y calidad magnética.

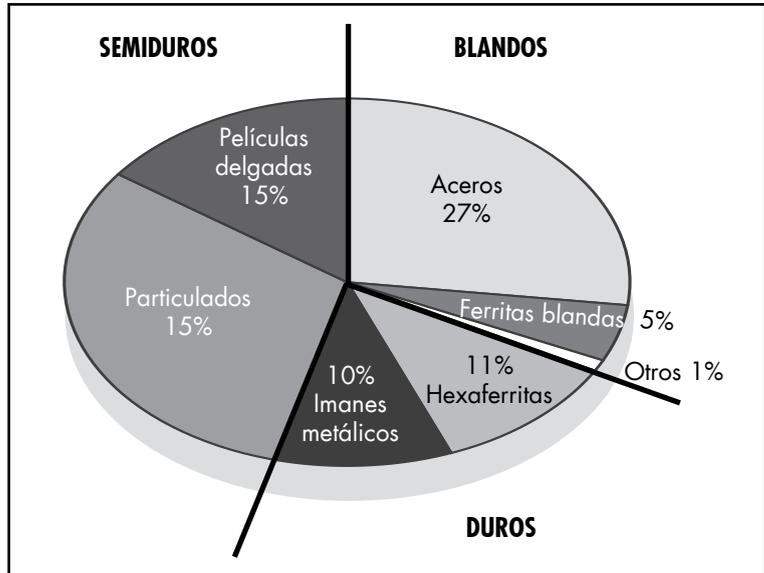


**Figura 2**

Las distintas familias de materiales magnéticos clasificados según su campo coercitivo. Se incluye también una estimación de su precio.

Atendiendo entonces a estos parámetros tecnológicos y económicos, podemos distinguir tres grandes familias de materiales magnéticos: dulces o blandos, semiduros y duros. De modo resumido, los materiales dulces se emplean en núcleos de transformadores, los duros en imanes permanentes, y los semiduros en grabación magnética.

Más aún, podemos clasificar los materiales en función de su importancia tanto por el volumen de material magnético empleado como por el gasto económico involucrado. En la figura 3 se representa la distribución del mercado mundial de materiales magnéticos.



### Figura 3

Distribución del mercado mundial de materiales magnéticos. Se hace una primera clasificación en materiales blandos, duros y semiduros, y se consideran las principales familias dentro de cada grupo.

A continuación pasamos a describir estas familias de materiales.

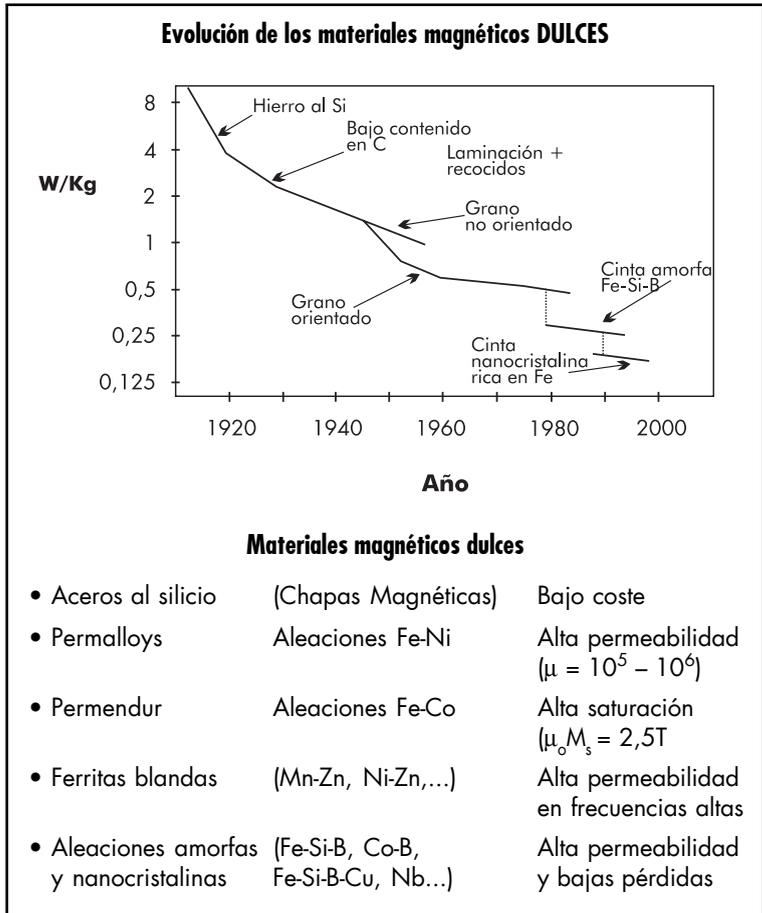
## 2.2. NÚCLEOS DE MÁQUINAS ELECTROMAGNÉTICAS

En la figura 4 se indican las principales familias de materiales magnéticos dulces y alguna de sus características según sus aplicaciones específicas. Los materiales para núcleos de transformadores y motores son con gran diferencia los más utilizados por volumen de materia prima y, por porcentaje de mercado global, los de mayor importancia.

Desde hace aproximadamente un siglo la energía se puede utilizar a grandes distancias de sus centros de producción debido a que se transmite fácilmente en forma de energía eléctrica. La eficiencia a escala industrial de los mecanismos de conversión —de la energía mecánica en eléctrica y viceversa— y de transporte de energía, se consigue gracias a los materiales magnéticos adecuados que actúan como núcleos de grandes transformadores, generadores y motores.

En la actualidad, en España se gastan al año unos  $10^{11}$  kilowatios/hora de energía eléctrica, con unas pérdidas de carácter magnético de aproximadamente el 1,4%, que se cede a la atmósfera en forma de calor. Esto significa que se disipan anualmente unos mil cuatrocientos millones de kilowatios/hora. Las consiguientes pérdidas de tipo económico podrían reducirse notablemente utilizando materiales con mejores prestaciones técnicas. Estas cifras ilustran un primer ejemplo de la incidencia económica de la importancia en la búsqueda de materiales magnéticos con propiedades optimizadas.

Los materiales que se utilizan como núcleos de las grandes máquinas de las compañías eléctricas, buques, fábricas, etc. son materiales dulces, y su representante típico es el acero al silicio, que en forma de láminas constituye un 90% de los mencionados núcleos y un 60% del volumen total de mercado de los materiales dulces. Dado el gran tonelaje de material magnético empleado, es de suma importancia la utilización de aquellos que representen costos lo más reducidos



#### Figura 4

Materiales dulces: Materiales para chapa de transformador y su evolución a lo largo del siglo XX. En la parte inferior se indican las principales familias y algunas de sus características.

posible. Además, debido a las implicaciones sociales y económicas en todos los aspectos, se deben evitar otros tipos de problemas, como por ejemplo los que surgen con el suministro internacional de materia prima.

Empezaremos por los materiales empleados en esa gran tecnología, y para ello se indica en la figura 4 la evolución a lo largo del siglo XX de cuáles han sido los materiales mayormente empleados en chapa magnética. El material primordial estará basado en hierro por su carácter magnético intrínsecamente dulce. La inclusión de algunas impurezas puede mejorar incluso ese comportamiento. Por ejemplo, el hierro con el 6,5% de impurezas de silicio da lugar a un comportamiento muy razonable, ya que se mantiene una elevada inducción magnética, consiguiéndose además una reducción notable de anisotropía magnética a resultas de la compensación tanto de la constante de magnetostricción como de la anisotropía magnetocristalina. La mejora del comportamiento tecnológico de este material básico se consigue mediante una serie de tratamientos de procesado térmico, los cuales, induciendo determinadas texturas, reducen las pérdidas histeréticas (textura Gross). Asimismo, se realizan procesos de laminación, de modo que se reducen las pérdidas a altas frecuencias.<sup>5</sup>

Las últimas generaciones de materiales dulces incluyen también las aleaciones estructuralmente amorfas y nanocristalinas, que son realmente los materiales más blandos al carecer prácticamente de anisotropía magnetocristalina (o bien, estar macroscópicamente promediada). Desde un punto de vista tecnológico, tienen el problema de presentar restricciones en cuanto a las dimensiones en que pueden ser fabricados. El espesor máximo alcanzable para conseguir estado

---

<sup>5</sup> Las pérdidas de energía originadas por corrientes inducidas o de Foucault puede expresarse como:  $W \approx \delta^2 B^2 \omega^2 / \rho$ , donde  $\delta$  representa el espesor,  $B$  la inducción magnética,  $\omega$  la frecuencia de trabajo y  $\rho$  la resistividad eléctrica de la chapa. Por tanto, habrá de emplearse materiales con elevada imantación —aleaciones ricas en Fe—, con anchura de chapa lo menor posible —de ahí el interés del laminado—, y con la mayor resistividad —de aquí la conveniencia de utilizar ferritas en numerosos casos.

amorfo en el proceso de fabricación es de unos 0,06 mm, y la anchura alcanzada hasta el momento es de unos 30 cm; por lo que se vienen aplicando hasta el momento sólo en pequeños transformadores y motores de dimensiones y potencia limitada.

Los grandes ámbitos de aplicación de los materiales blandos o dulces en esta área son los siguientes:

### **2.2.1. Núcleos de grandes transformadores: Aceros al silicio**

En grandes transformadores, generadores y en grandes máquinas eléctricas se requiere el paso de elevadas intensidades de corriente y alto voltaje. Este tipo de aplicación es posiblemente la de mayor trascendencia, dado que permite el "traslado" de la energía desde los centros donde se genera (pantanos, centrales de energía, etc.) hasta los lugares donde se emplea (fábricas, ciudades, etc.). Los transformadores, generadores y motores en general pueden ser definidos a partir del concepto de multiplicador de flujo magnético. Una bobina que rodea un núcleo de material magnético y por la que circula una corriente alterna, origina variaciones en el estado magnético de ese material. Estas variaciones producirán una corriente eléctrica inducida en un bobinado secundario.<sup>6</sup>

Las pérdidas de energía magnética en el núcleo son de dos tipos que ya han sido mencionados previamente: las asociadas al proceso de imantación, determinadas por las anisotropías magnéticas, y las debidas a las corrientes de Foucault, que surgen como consecuencia de emplear altas frecuencias en la corriente excitadora.

---

<sup>6</sup> El voltaje inducido o voltaje de salida en el secundario se puede expresar como:  $V_{ind} \approx N\omega\chi V_{esc}$ , siendo N el número de vueltas del bobinado secundario,  $\omega$  la frecuencia de trabajo,  $\chi$  la susceptibilidad de la chapa magnética, y  $V_{esc}$  el voltaje de entrada en el bobinado primario.

Los materiales empleados son aleaciones muy ricas en hierro. La familia de materiales de mayor uso son los aceros al silicio, dadas las relativamente bajas pérdidas que presentan y el bajo coste de la materia prima y su acabado. La chapa de transformador ha ido mejorando su rendimiento mediante diversos tratamientos de procesado. Así, cabe mencionar los aceros de bajo contenido en carbono, aceros de grano orientado, laminados, etc. Estos procesados mejoran el comportamiento a altas frecuencias y reducen especialmente las pérdidas por corrientes de Foucault.

### **2.2.2. Núcleos y piezas en pequeños transformadores y motores: *Permalloys* y otras aleaciones**

En el caso de pequeños transformadores, motores y convertidores, así como en inductores y, en general, en equipamientos de telecomunicaciones, la intensidad y voltaje utilizados son más reducidos, y se requieren materiales dulces especialmente con una elevada susceptibilidad magnética. Se emplea con frecuencia otra familia de aleaciones cuyo carácter magnético es muy blando como son los denominados *permalloys*. Son materiales de muy alta susceptibilidad o permeabilidad magnética, cuya composición contiene esencialmente hierro y níquel. Se caracterizan por poseer muy baja anisotropía magnética tanto de origen magnetocristalino como magnetoelástico, lo que les confiere además muy bajas pérdidas magnéticas. En este caso, el volumen de material necesario es inferior al de los grandes transformadores, por lo que ahora importa menos el bajo coste de la materia prima.

Dentro de esta apartado debemos considerar también otras aleaciones de alto contenido en Fe, que, por sus aplicaciones particulares, requieren una forma específica. Piezas de aleaciones magnéticas blandas con forma muy diversa pue-

den obtenerse mediante procesados y sinterizados especiales. El campo de aplicaciones es muy amplio: en automoción (por ejemplo, en sistemas de frenado ABS), ordenadores (piezas en impresoras o freno de disco de ordenador), electromedicina (aleaciones Invar sinterizadas), etc.

### **2.2.3. Componentes electrónicos: Ferritas blandas**

Otra familia de materiales blandos que se emplea con gran profusión son las ferritas con características magnéticamente blandas y que poseen estructura cristalina cúbica del tipo espinela (óxido de magnesio y aluminio). Se caracterizan por su bajo coste, alta capacidad de ser modeladas con formas adecuadas al problema concreto y por su elevada resistividad eléctrica —del orden de un millón de veces superior al de otros materiales magnéticos blandos con carácter metálico—, lo cual implica una importante ventaja al reducir notablemente las pérdidas energéticas especialmente a frecuencias de trabajo elevadas. Por lo demás, esta alta resistividad hace innecesario el mencionado proceso de laminado. Una desventaja genérica de las ferritas es, sin embargo, su reducida imantación de saturación, consecuencia de su naturaleza ferrimagnética.

Las ferritas se utilizaron, en la década de los años sesenta, como núcleos de memorias magnéticas por su alta capacidad de saturación (ciclos de histéresis cuadrados), así como en amplificadores magnéticos. Actualmente, se emplean también en diversos dispositivos electrónicos de frecuencia en el área de la industria del automóvil —en pequeños motores en ventanillas, limpiaparabrisas, etc., o como *transponders* para sistemas antirrobo o monitorización de presión en neumáticos—, o en medicina, como *transponders* para monitorización e identificación de tumores, etc.

En cuanto al tipo de ferritas, debemos citar especialmente las de composición manganeso-zinc y níquel-zinc. En la ta-

bla 1 se indican algunas de las principales aplicaciones de estas ferritas en componentes electrónicos.

DISPOSITIVO	FUNCIÓN	FRECUENCIA DE TRABAJO	PROPIEDAD ESPECÍFICA
Inductores	Circuitos filtrados, resonantes	1-100 MHz	Alta $\mu$ , estabilidad con T y t
Transformadores	Transformadores V e I	Hasta 500 MHz	Alta $\mu$ , baja histéresis
Antenas	Recepción ondas EM	Hasta 15 MHz	Alta m, alta resistividad
Bobinas de encendido	Separación señales ac y dc	Hasta 250 MHz	Moderada/Alta $\mu$ , alta pérdidas por histéresis, alta B
Transformadores de potencia	Convertidor de potencia	Hasta 60 KHz	Baja histéresis, alta B
Bobinas de carga	Carga de impedancia	Audio	Alta $\mu$ , alta B, estabilidad con T, t y dc bias
Transformadores <i>flyback</i>	Convertidor de potencia	Hasta 100 kHz	Alta $\mu$ , bajas pérdidas por histéresis, alta B

Siendo  $\mu$ : permeabilidad del material magnético  
 B: inducción magnética  
 ac: corriente alterna  
 dc: corriente continua  
 T: temperatura  
 t: tiempo

### Tabla 1

Algunas aplicaciones de ferritas blandas.

#### **2.2.4. Las últimas tendencias: Aleaciones amorfas y nanocristalinas**

Como se ha mencionado previamente, los materiales magnéticos blandos deben presentar mínimas pérdidas energéticas, lo cual requiere esencialmente valores lo más reducidos posible de magnetostricción, tensiones mecánicas y anisotropía cristalina. Es también deseable una alta resistividad eléctrica, y la disposición en geometrías especiales (laminados). Las dos formas de conseguir esto son:

- a) empleo de materiales amorfos de magnetostricción nula, o bien
- b) uso de aleaciones nanocristalinas. En el primer caso y por definición, tanto la anisotropía magnetocristalina como la magnetoelásticas son mínimas y, además, su resistividad es alta (aproximadamente un orden de magnitud más elevada que la aleación cristalizada de idéntica composición).

En el segundo caso, estos materiales nanocristalinos están constituidos por pequeños granos cuyo tamaño es de unos 10 nanómetros embebidos en una matriz con estructura amorfa. Sucede aquí un efecto de compensación de la constante de magnetostricción entre las dos fases cristalina y amorfa (de signos opuestos entre sí) y, por otra parte, la anisotropía magnetocristalina se promedia macroscópicamente.

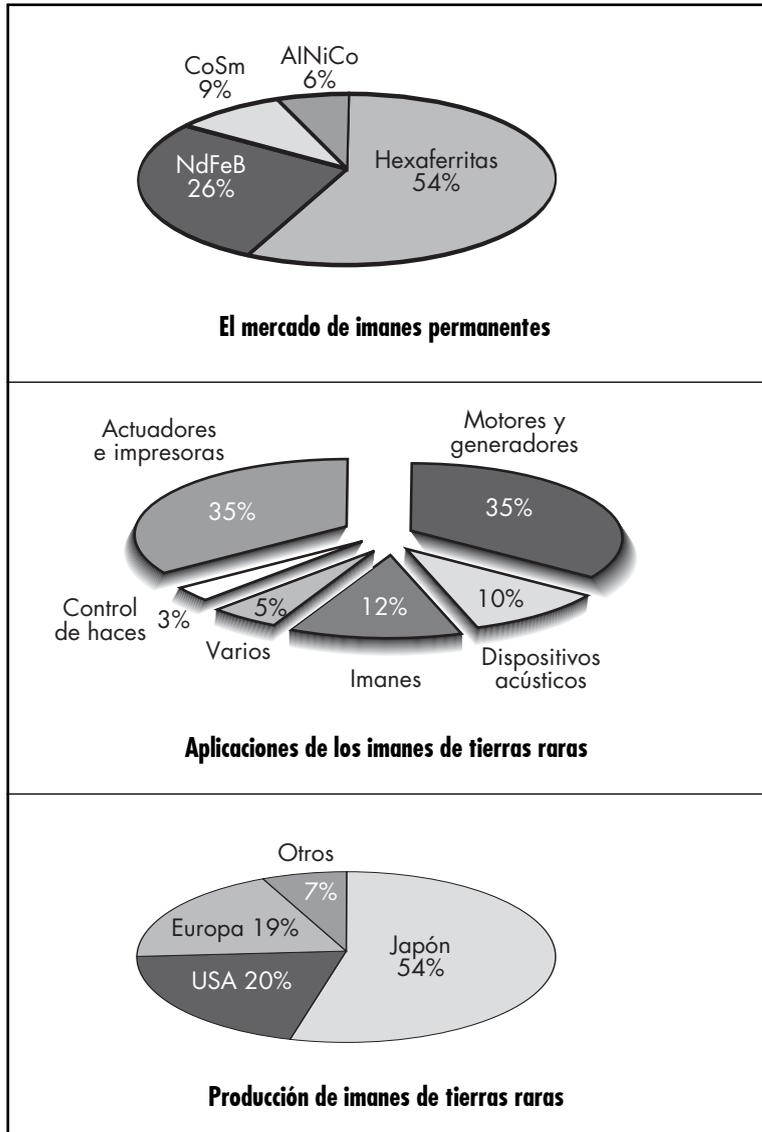
La obtención de estos nuevos materiales con mínimas anisotropías magnéticas de todo tipo se consigue, por un lado, ensayando nuevas composiciones y tratamientos de procesado y, por otro, empleando también nuevas técnicas de fabricación. Brevemente, mencionaremos que la obtención a gran escala de vidrios metálicos se ha posibilitado mediante el desarrollo de técnicas como el enfriamiento ultrarrápido —velocidad de enfriamiento de hasta un millón de grados centígrados por segundo— a partir de las aleaciones en estado líquido. Por otra parte, mientras que

los tratamientos térmicos posteriores dan lugar a la cristalización del material y su pérdida de propiedades tecnológicas, en el caso de algunas aleaciones se puede retrasar el proceso de cristalización obteniendo la mencionada estructura nanocristalina.

### **2.3. IMANES PERMANENTES**

Los materiales magnéticos duros poseen la cualidad de generar elevados campos magnéticos en su entorno. Esto se debe al elevado valor de su imanación remanente o, más exactamente, al punto de trabajo del ciclo de histéresis, que queda definido por el campo desimanador y se encuentra en el segundo cuadrante del ciclo de histéresis. La imanación en el punto de trabajo genera campos magnéticos intensos en sus proximidades. De alguna manera, la cualidad de dureza magnética se puede también medir a partir del campo coercitivo que indica el campo magnético externo necesario para anular aquella remanencia. Los materiales duros se emplean genéricamente en dos amplios campos: como imanes permanentes y como materiales para grabación magnética.

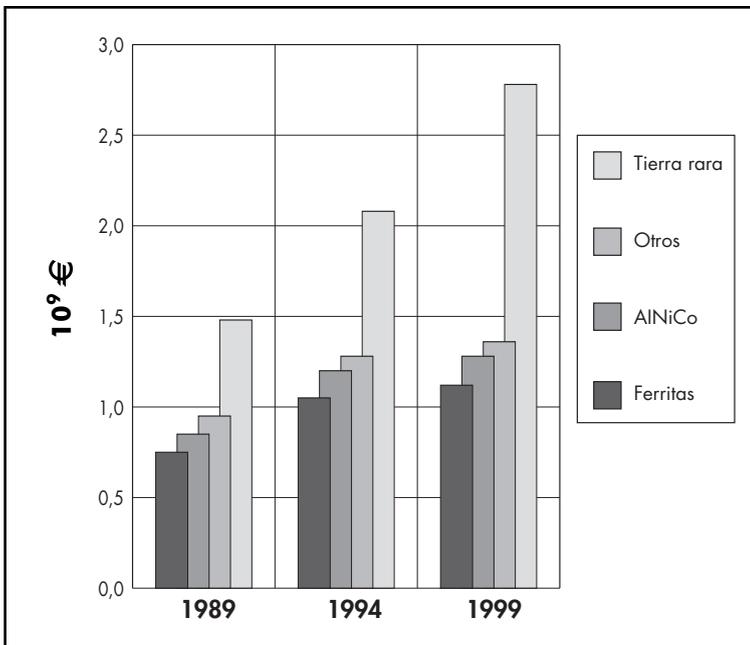
En la figura 5 se presentan, respectivamente, las distribuciones de imanes permanentes según las diversas familias y sus aplicaciones tecnológicas. Hay que hacer notar, en primer lugar, el gran volumen relativo de ferritas duras a pesar de sus, comparativamente, inferiores prestaciones técnicas. En los últimos años, y a pesar del incremento de los imanes basados en familias de tierras raras, las ferritas mantienen una importancia relativa muy alta (ver la figura 6). Otro aspecto muy destacable es la enorme importancia de Japón como país que factura materiales de imanes permanentes. Esto es debido a su importante tecnología y al liderazgo de alguna industria líder en el sector, a pesar de que las materias primas, en particular las tierras raras, proceden en gran medida de otro importante país como es China.



**Figura 5**

Clasificación de materiales duros por sus composiciones (porcentaje en volumen) (a), por sus aplicaciones (b), y por los países de facturación de imanes de tierras raras (c).

Como decimos, las aplicaciones de los materiales duros y semiduros pueden clasificarse en dos grandes grupos: imanes permanentes y memorias magnéticas. Un 30% de los materiales magnéticamente duros se utilizan para la fabricación de imanes permanentes. Las aplicaciones tecnológicas de los imanes cubren un amplio espectro que incluye desde la industria aeroespacial y la industria del automóvil —téngase en cuenta que cada coche lleva por término medio 20 imanes permanentes— hasta la industria electrónica que utiliza los imanes como elementos básicos formando el estator de algunos motores o el rotor de magnetos. Altavoces, auriculares, marcadores telefónicos, separadores de materiales utilizados en minería y selectores de moneda son ejemplos de dispositivos basados en el funcionamiento de imanes permanentes.



**Figura 6**

Evolución en los últimos 10 años del mercado de las familias de imanes.

El espectacular incremento de las propiedades magnéticas duras de los compuestos hierro-tierra rara, obtenidos desde la década de los años setenta, ha permitido incrementar el espectro de aplicaciones de los imanes, principalmente en el campo de los motores lineales. También es cada día superior el número de dispositivos que utilizan imanes para producir campos magnéticos que anteriormente solo podían conseguirse con electroimanes.

Entre las utilidades concretas de los imanes permanentes podemos citar las siguientes:

1. En primer lugar para convertidores de energía eléctrica en mecánica. Entre ellos cabe citar los altavoces (en multitud de equipos de radio, etc.), en pequeños motores como estátor (por ejemplo, en electrodomésticos como cuchillos o cepillos eléctricos, y en vehículos como en limpiaparabrisas o ventiladores), en instrumentos de medida (como galvanómetros, voltímetros, etc.) o en receptores de teléfono.
2. En convertidores de energía mecánica en eléctrica. Por ejemplo, en micrófonos o bien en magnetos que son empleados para la ignición de motores de todo tipo (cortacésped, fueraborda, etc.).
3. Para control de trayectoria de cargas eléctricas en movimiento. Para equipamiento de comunicaciones y radar (magnetron y guía de ondas), tubos de televisión, etcétera.
4. Como típicos imanes: por ejemplo, en numerosos juguetes, en llaves magnéticas, selectores de moneda, etcétera.
5. Imanes para la sujeción de plataformas metálicas (sector de la construcción) y posicionamiento de piezas magnéticas (en estructuras metálicas), para la selección y clasificación de residuos (por ejemplo, en plantas de tratamientos de residuos y clasificadoras de escombros), y como piezas en electroimanes para el izado de cargas.

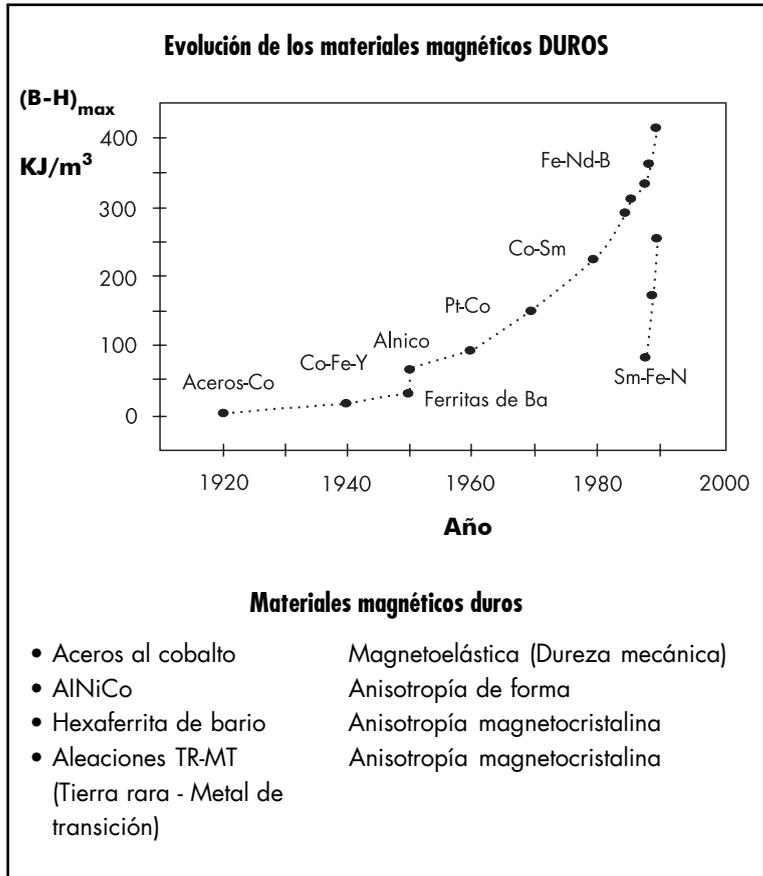
6. Para procesos industriales de descalcificación de tuberías, tratamientos iónicos, etc.

¿Qué tipo de materiales se emplean para estas aplicaciones? En la figura 7 se ha representado la evolución a lo largo de este siglo de las diferentes clases de materiales que han ido empleándose. En primer lugar, se debería citar la piedra imán o magnetita y, también, a pesar de haber quedado ciertamente obsoletos, los aceros duros (el típico imán de herradura). Estos últimos, al contener un alto porcentaje de carbono, eran también utilizados como agujas de brújula.

En el ámbito industrial, debemos citar a las aleaciones denominadas genéricamente alnicos, que contienen los tres elementos ferromagnéticos básicos (hierro, cobalto y níquel), con la inclusión de aluminio y, en determinadas ocasiones, otros elementos, como cobre y titanio. Estas aleaciones, tras ser sometidas a determinados procesos están constituidas por granos magnéticos monodominio muy alargados, lo que les permite presentar una elevada anisotropía magnética de forma (ver sección 1.1).

Otros materiales competitivos con los alnicos son las denominadas ferritas duras. Las ferritas duras son óxidos magnéticos —al igual que las blandas— y poseen estructura cristalina con simetría hexagonal y una elevada anisotropía magnetocristalina. Las ferritas duras más empleadas son las hexaferritas de bario y de estroncio.

Por último, los materiales duros más avanzados están constituidos por aleaciones de tierra rara (Nd, Sm,...) y metales de transición (Fe o Co). Se pueden distinguir dos grandes familias: las basadas en imanes del tipo SmCo y aquellas otras basadas en NdFeB. En estos imanes, el elemento de tierra rara (por ejemplo, Nd o Sm) proporciona una fuerte anisotropía magnética, origen de la dureza del material, mientras que el elemento magnetógeno (Fe o Co) proporciona una elevada imantación y, por tanto, respuesta magnética. Estas aleaciones presentan una elevada anisotropía cristalina y poseen las mejores prestaciones técnicas, aunque



**Figura 7**

Evolución a lo largo del siglo XX de las familias de imanes permanentes. En la parte inferior se indica el origen de la dureza magnética de cada familia.

con algunas desventajas en cuanto a precio y a estabilidad térmica.

A lo largo de los últimos años se ha venido investigando la influencia de incluir nuevos elementos en las aleaciones de imanes permanentes, o bien diferentes procesados con el

objetivo de optimizar sus propiedades magnéticas. En primer lugar debemos mencionar los denominados *spring magnets*, en los que, al añadir una determinada cantidad de fase magnética blanda (esencialmente Fe) al material basado típicamente en NdFeB, se induce un mayor acoplamiento magnético entre fases, lo que da lugar a un moderado incremento del producto de energía del imán: se observa un apreciable incremento de la remanencia y una cierta reducción del campo coercitivo.

Por otra parte, distintos procesados han sido desarrollados para endurecer magnéticamente el material: mediante su inhomogeneización estructural, obstaculizando mediante centros de anclaje el desplazamiento de paredes magnéticas, o dando lugar a nuevas fases estructurales con anisotropía magnética incrementada, dificultando el proceso de rotación de la imanación. Entre estas tecnologías debemos citar:

- a) Procesos de sinterizado y de enfriamiento rápido que dan lugar a dos tipos de imanes permanentes a pesar de su misma composición, y a la consiguiente carrera tecnológico-comercial de empresas competidoras.
- b) Procesados que permiten la inclusión de elementos de menor peso atómico —fundamentalmente hidrógeno y nitrógeno— en las fases aleadas, incrementando el carácter inhomogéneo estructural y facilitando la aparición de fases con mayor anisotropía.
- c) El aleado mecánico, mediante el cual se muelen polvos de diferentes elementos, de modo que el calor generado da lugar a la aparición de la propia aleación de la mezcla original o de nuevas fases (compuestos tipo SmFeN).
- d) Por último, recientemente se han desarrollado técnicas muy complejas de procesados térmicos y mecánicos conducentes a la modificación de su estructura —por ejemplo, el proceso por el que se obtiene polvo fino por decrepitación al absorber hidrogeno, seguido de tratamiento térmico que origina la pérdida del hidrógeno

y la posterior cristalización (en inglés HDDR)—, tanto para los imanes basados en NdFeB como las familias del tipo SmCo.

Finalmente, existen otros factores que determinan el deterioro del carácter duro de los imanes. Entre ellos hay que considerar:

- 1) La energía magnetostática o acoplamiento magnético dipolar entre granos o bien en los bordes del imán.
- 2) El acoplamiento de canje entre distintas fases.
- 3) El poseer una temperatura de Curie próxima a la temperatura de trabajo, etc.

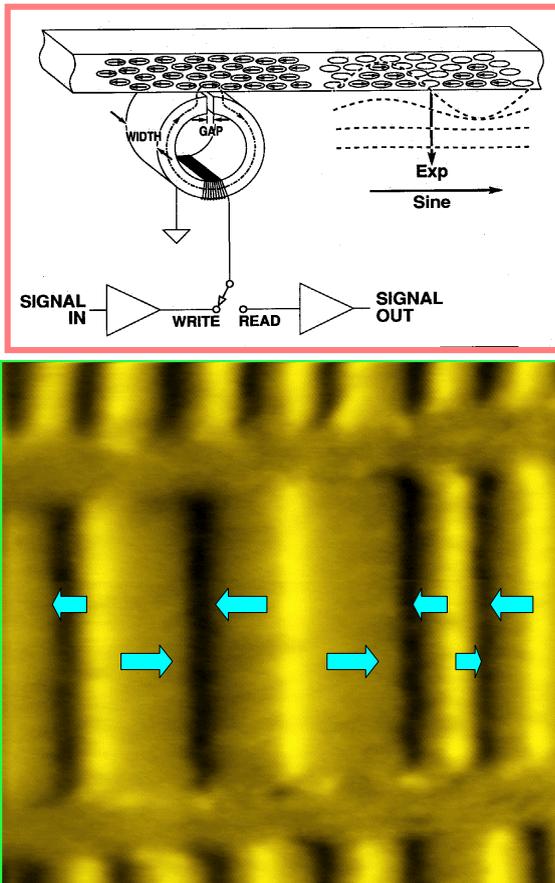
Estos problemas que incluyen aspectos tanto de simulación micromagnética como de búsqueda de nuevas fases, se están llevando a cabo en numerosos centros tecnológicos.

## **2.4. GRABACIÓN MAGNÉTICA: MEDIOS, ESCRITURA Y LECTURA**

El proceso de grabación y lectura magnética requiere tres elementos magnéticos: el medio o soporte en donde se almacena la información magnética, la cabeza grabadora de dicha información, y la lectora. Cada uno de estos tres elementos precisa de unas características magnéticas peculiares. Pero antes de entrar en la materia, parece conveniente recordar algunos fundamentos de la grabación magnética.

El soporte o medio para el almacenamiento de información debe ser un material magnético subdividido en pequeñas regiones o dominios en donde los momentos magnéticos poseen la misma dirección. Cada uno de estos elementos constituye una unidad de información o *bit* magnético. En general, existen dos direcciones preferentes, de modo que, en esencia, el almacenamiento de información consiste en disponer según un código particular la imanación en una

secuencia de dominios. En la figura 8, cada dominio en el medio soporte está representado por partículas elipsoidales. La cabeza grabadora se basa en el efecto inductivo para escribir una información o secuencia de dominios particular. Como se observa en esa figura, la cabeza genera un



**Figura 8**

Grabación magnética: El medio magnético y las cabezas grabadora y lectora. Imágenes de dominios magnéticos obtenidos por microscopía de fuerzas magnéticas en una pista de un disco duro (20 $\mu$ m x 20 $\mu$ m).

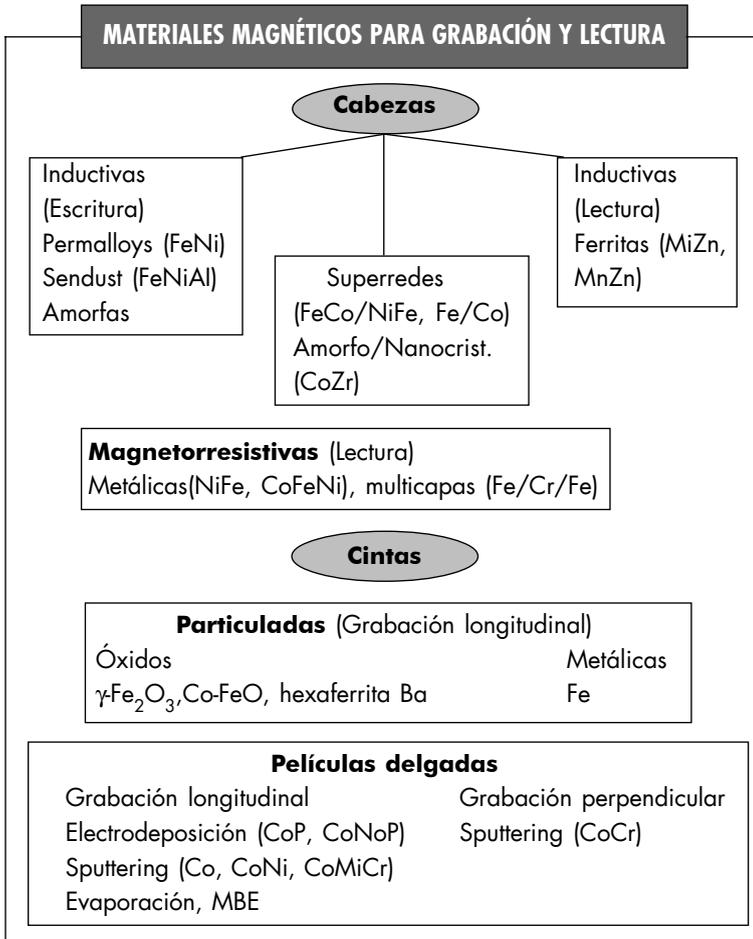
campo magnético en el entrehierro de un circuito magnético y en sus proximidades, de modo que, según la dirección del campo generado en ese entrehierro, se puede imantar en un sentido o en el contrario cada uno de los dominios del medio magnético. Esa dirección se determina a voluntad mediante el sentido de la corriente que pasa por el bobinado del circuito. Por su parte, la cabeza lectora inductiva funciona de modo análogo pero a la inversa, es decir, los dominios del medio generan un campo magnético en el circuito e, inductivamente, dan lugar a pequeños voltajes en la bobina, cuyo sentido está determinado por la orientación de la imanación en cada dominio.

Respecto del medio magnético, debemos indicar que debe poseer características magnéticas semiduras —campo coercitivo del orden de unidades de kOe (ver la figura 1)—, con anisotropía magnética relativamente elevada siendo su origen, en general, magnetocristalino o de forma. Debe poseer un campo coercitivo suficientemente elevado para que la información almacenada —la orientación de la imanación en cada dominio— no se destruya fácilmente bajo la acción de un campo magnético indeseado. Y, por otra parte, tampoco debe ser excesivamente grande como para dificultar la propia grabación y lectura de esa información.

Existen dos tipos de medios en función de que la grabación sea longitudinal o perpendicular. Estos medios se caracterizan porque en cada uno de ellos los dominios elementales de información poseen ejes de fácil imanación en el plano del medio soporte o en su dirección perpendicular.

Por otra parte, los medios magnéticos pueden ser de dos tipos: particulados y películas delgadas. Los medios particulados están formados por partículas magnéticas, generalmente óxidos, bien alargadas, para poseer elevada anisotropía de forma, o bien con alta anisotropía cristalina, como es el caso de las ya mencionadas hexaferritas. Estos óxidos se emplean generalmente en grabación longitudinal, mientras que partículas metálicas de Fe y elevada anisotropía de forma son utilizadas en grabación perpendicular. La alternativa a estos

medios particulados de soporte son las películas delgadas empleadas actualmente tanto para grabación longitudinal —obtenidas por electrodeposición, *sputtering* o evaporación—, como para grabación perpendicular (*sputtering*). En cuanto a las cabezas de escritura inductiva (véase la figura 9), los materiales más empleados se encuentran entre



**Figura 9**

Los tipos de materiales magnéticos empleados para registro magnético.

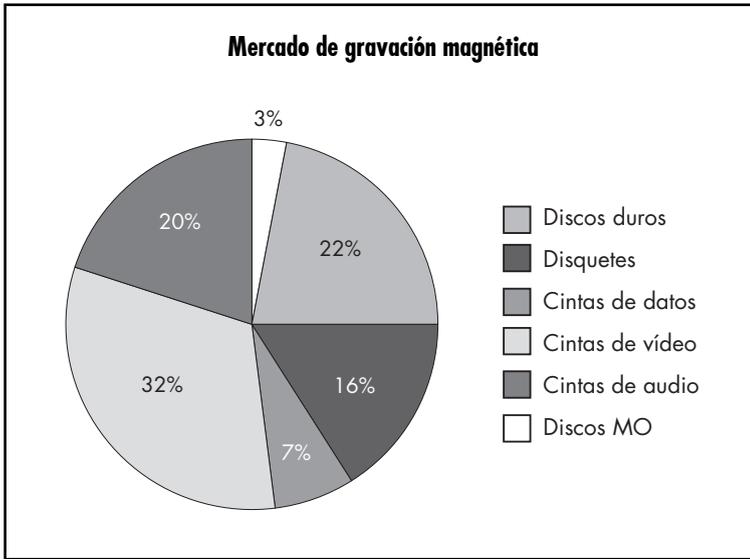
los materiales blandos antes mencionados, como por ejemplo *permalloys*, *sendust* o aleaciones amorfas y, más recientemente, superredes con base de Fe/Co y CoZr.

Las cabezas lectoras inductivas emplean generalmente ferritas blandas (Ni-Zn, Mn-Zn), aunque más recientemente se han incorporado cabezas lectoras basadas en efecto magnetorresistivo de tipo metálico (NiFeCo) y multicapas (Fe/Cr/Fe). En la figura 9 se resumen los materiales magnéticos empleados en los distintos aspectos de la grabación magnética: cabezas magnéticas de escritura y lectura tanto inductivas como magnetorresistivas, y los medios o soporte del almacenamiento de información tanto particulados como películas delgadas.

Los materiales empleados como medio soporte de grabación tienen carácter magnético semiduro, si bien con frecuencia se les incluye en un apartado diferente debido, por una parte, a su forma (película o cinta delgada) y, por otra, a que en ellos aparecen multitud de pequeños imanes microscópicos. Precisamente, en la alteración del estado magnético de estos imanes radica el concepto de grabación y, además, cuanto más pequeños sean estos imanes, mayor será su densidad y, por tanto, la capacidad de almacenar información.

Un 70% de las aplicaciones que engloban a los materiales duros y semiduros corresponde a las memorias magnéticas, esenciales en la tecnología de la información. Se incluye bajo este término todos los instrumentos y dispositivos basados en la información que puede obtenerse del estado de imanación de una secuencia de unidades magnéticas distribuidas espacialmente en un material.

En la figura 10 se informa de la distribución del mercado mundial de grabación magnética. Los materiales semiduros constituyen el elemento básico de los disquetes de ordenadores, memorias auxiliares de gran capacidad de almacenaje (disco duro), bandas magnéticas de las tarjetas de crédito, de las tarjetas de identificación y de los billetes de transportes, cintas magnetofónicas y cintas de vídeo tanto



**Figura 10**

Distribución del mercado de grabación magnética.

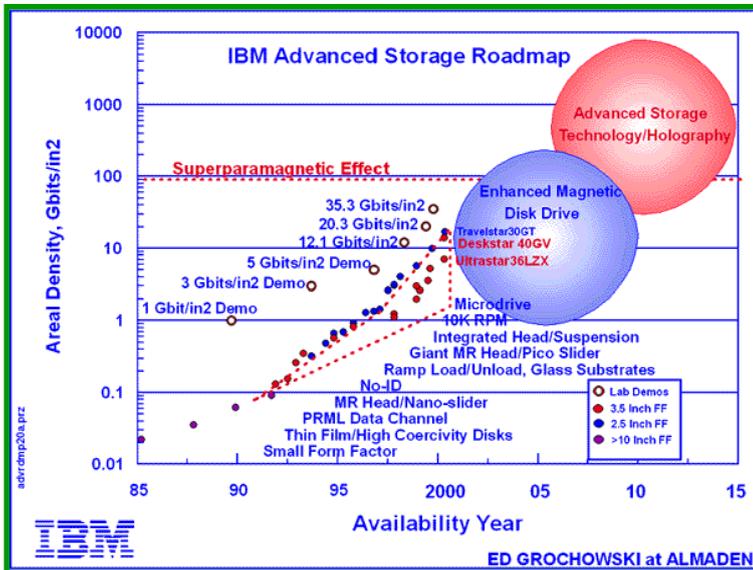
comerciales como profesionales. En todas estas aplicaciones el óxido de hierro  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  es el material que presenta actualmente mejor combinación de ventajas. Este óxido de hierro y otros similares están típicamente constituidos por finas partículas alargadas, por lo que su dureza magnética radica en la anisotropía de forma. El almacenamiento de información (grabación) y su lectura están íntimamente relacionadas con el fenómeno de inversión de la imanación según las dos direcciones que determinan el eje de cada partícula.

La industria relativa a la grabación magnética abarca un amplio tipo de aplicaciones como son la grabación digital, audio, vídeo, etc. Otro tipo de aplicaciones se refiere a bandas magnéticas impresas en billetes de vehículos públicos, tarjetas magnéticas, etc. Esta industria es probablemente la que tiene mayor repercusión económica. Sin embargo,

en España tiene una importancia bastante escasa, como se verá en una sección posterior. El mercado de grabación magnética está internacionalmente liderado por grandes empresas multinacionales, como IBM, Xerox, 3M, Hewlett-Packard o Seagate, por lo que entrar en competición con ellas es difícil. Por otra parte, es un campo que actúa como estimulador de la investigación. Sirva como ejemplo del ritmo de desarrollo de los materiales y métodos utilizados en la tecnología de memoria magnética la evolución de la densidad de los discos de cabeza magnetorresistiva desde 1970 a 2000, como se indica en la figura 11. Mientras en 1980 las películas delgadas podían contener 10 megabites de información por pulgada cuadrada, esta subió a 100 en 1992 y a 1.000 en 2000. La magnetoóptica ha permitido una resolución de 30 a 50 nm y ha incrementado la capacidad de almacenaje hasta 45 gigabits por pulgada cuadrada.

El mercado de la grabación magnética es el mayor del conjunto de los materiales magnéticos, superior prácticamente a la suma del resto de los materiales. Hay diferentes aspectos que influyen o determinan esta inusitada y colosal actividad comercial-económica. Por una parte, la capacidad de mercado en relación con una mayor capacidad de almacenamiento de datos —por ejemplo, almacenar diagnósticos y datos médicos en un hospital (radiografías, etc.), en bancos, centros de educación, grandes empresas, etc., donde se requiere la digitalización de un enorme volumen de memoria todavía no completamente saturado—. Ocurre lo mismo con el incesante aumento de necesidades de actividades interactivas, como medios interactivos multimedia, centrales de comunicación, etc. Otro aspecto que fuerza esa actividad es el notable incremento de capacidad tecnológica de almacenamiento, que va superando incluso las sucesivas previsiones realizadas.

En la actualidad, se viene desarrollando un enorme trabajo con objeto de mejorar las características magnéticas y resolver los problemas tecnológicos de la grabación, tanto en lo



**Figura 11**

Perspectivas en la densidad de grabación.

que se refiere a las cabezas magnéticas como al medio. En primer lugar, y en particular en la grabación longitudinal, debemos mencionar el límite a la capacidad de almacenar información magnética derivada del tamaño mínimo de las unidades magnéticas. En el caso de sistemas particulados especialmente, hay que tener en cuenta que, por debajo de un tamaño crítico de partícula, el material se comporta como superparamagnético, con lo cual se reduce drásticamente el campo coercitivo. Este tamaño crítico, a una temperatura determinada, depende fundamentalmente de la intensidad de la anisotropía magnética bien sea de forma —lo cual se consigue con partículas de alta relación longitud-diámetro— o bien magnetocristalina. Se requieren, por tanto, materiales con un campo coercitivo superior. Desde el punto de vista de la anisotropía de forma, son prometedores de un más largo futuro los medios de grabación perpendicular, en

los que se posibilita el jugar con la dimensión perpendicular al plano del medio para incrementar el factor de forma. Para dimensiones próximas al tamaño crítico, sin embargo, un problema que hay que tener en cuenta es también el derivado de las fluctuaciones térmicas, que pueden deteriorar las propiedades magnéticas del medio de grabación. A la hora de determinar la capacidad efectiva de almacenar información magnética, también es importante considerar las interacciones entre unidades de información o bits, de modo que existe una distancia efectiva (frontera entre bits) inhábil para la grabación. Este problema se reduce igualmente con el empleo de materiales con anisotropía magnética más elevada. Los efectos desmagnetizadores y térmicos se estudian intensivamente en la actualidad por ser los que muy próximamente van a determinar el límite de capacidad de grabación. Una densidad de 100 Gbits/inch<sup>2</sup> requiere bits de unos 50 nm de lado, lo cual no ha sido aún alcanzado. Según recientes informes, la máxima densidad de grabación alcanzada por IBM y Seagate es de unos 30 Gbits/inch<sup>2</sup>.

Otro aspecto de gran importancia tecnológica es el espesor de la capa protectora o recubrimiento sobre el soporte magnético con objeto de evitar efectos de envejecimiento y corrosión. Esta capa debe ser de espesor inferior a la distancia entre el medio magnético y la cabeza lectora, que es del orden de pocas decenas de nanómetros en los sistemas más avanzados, lo cual en estos momentos plantea serios problemas. Esa distancia debe ser lo más pequeña posible al reducir las dimensiones del bit, para que se pueda recoger exclusivamente la información individual de cada uno de ellos. Otro importante aspecto es el de reducir la relación ruido-síñal, así como el procesado electrónico de codificación y descodificación de las señales tanto grabadas como leídas. Por último, otro problema técnico es el de los microposicionadores y micromotores que permiten el control de la posición de los ejes de lectura. La miniaturización de estos dispositivos es absolutamente necesaria para po-

der emplear medios con mayor capacidad de almacenamiento de información.

Desde el punto de vista de las cabezas magnéticas se hace imprescindible llegar a ciertos desarrollos para mejorar su sensibilidad. Esto requiere el desarrollo o implementación de nuevas técnicas y en particular las litográficas

## **2.5. AUTOMATIZACIÓN: RELÉS, SENSORES Y ACTUADORES MAGNÉTICOS**

Algunos materiales con carácter magnético relativamente blando también se utilizan para otras aplicaciones en áreas muy diversas en dispositivos tipo relé o como elementos sensores en una enorme variedad de dispositivos.

Numerosos relés y distintos tipos de válvulas emplean aleaciones magnéticas blandas para aplicaciones en el sector de la automoción (regulación de amortiguación en sistemas de suspensión, inyección de combustible, equipos inteligentes controlados electrónicamente, pistón dosificador en bomba de inyección, etc.), electromedicina (válvulas empleando aleaciones Invar sinterizadas), electrodomésticos (electroválvulas en cocinas o calentadores), etc.

Los dispositivos sensores permiten detectar el valor de una propiedad física por el efecto que produce sobre otra de fácil manejo. En general el principio de funcionamiento de un sensor magnético consiste en la transformación de la variación de una magnitud magnética (susceptibilidad, imantación, etc.) en un voltaje eléctrico proporcional a dicho cambio. Esa magnitud puede depender de la temperatura, tensión, campo magnético, etc., de modo que, mediante la electrónica adecuada, el voltaje de salida del sensor puede ser utilizado como entrada de otro dispositivo que controle la propiedad física detectada por ese sensor. Este es el concepto básico que subyace en toda operación de control, automatización o robótica.

Los sensores magnéticos son empleados en multitud de oca-

siones como, por ejemplo, para detectar campos magnéticos como los utilizados en geofísica, para el control de rumbo en satélites artificiales y otras técnicas aeroespaciales o en la detección de paso de vehículos. Otros tipos de sensores se emplean para medir tensiones mecánicas, deformaciones geométricas, temperatura, etc. Debe destacarse también el enorme impulso que la aplicación de los sensores magnetoelásticos está adquiriendo en biomedicina.

En función de los principios físicos y de los efectos en que se basan, los sensores magnéticos pueden ser clasificados en:

- a) Sensores magnetoelásticos.
- b) Sensores magnetogalvánicos.
- c) Sensores inductivos (incluyendo corrientes de Foucault).
- d) Sensores de Wiegand y de ciclo biestable.
- e) Sensores magnetorresistivos.
- f) Magnetómetros de SQUID (interferencia cuántica superconductiva).
- g) Sensores de campo magnético, basados en poseer un núcleo saturante (*flux-gate*), en bobinas inductoras, etc.

Los sensores de tipo magnetoelástico se fundamentan en las variaciones del comportamiento magnético —generalmente a través de las variaciones de permeabilidad magnética— con las tensiones mecánicas, o presiones con las que se solicita al elemento sensor. Es necesario, por tanto, emplear materiales sensores de elevada magnetostricción. En ocasiones, la utilización de tecnología híbrida piezoeléctrico/magnetorresistivo da lugar a una notable optimización en cuanto a la eliminación de bobinados y al incremento de sensibilidad.

La resolución de un magnetómetro SQUID es la mayor alcanzada hasta el momento (1 fT), y se basan en el efecto Josephson y en la cuantización de flujo magnético en el elemento superconductor.

Además de los diferentes tipos de sensores es necesario

mencionar el hecho de que con frecuencia se pretende eliminar los campos magnéticos, para lo cual se requiere un apantallamiento magnético. Es necesario en este caso emplear materiales muy blandos, de elevada permeabilidad y que, por tanto, "atraigan" a las líneas de campo magnético. Se emplean chapas de aleaciones de Fe-Ni, Fe-Si y Fe o aleaciones blandas, como las amorfas, en particular las ricas en Co de baja magnetostricción.

Los sensores magnetogalvánicos son aquellos que se fundamentan en los efectos magnetorresistivos y el efecto Hall. El efecto Hall consiste en la aparición de un campo transversal sobre un conductor alargado sobre el que circula una corriente eléctrica cuando se coloca en una región del espacio donde existe un campo magnético. Los sensores de magnetorresistencia se basan en el cambio de resistencia eléctrica de determinados semiconductores ante un campo magnético. El efecto magnetorresistivo anisótropo en películas delgadas ferromagnéticas se emplea principalmente en lectura de grabación magnética.

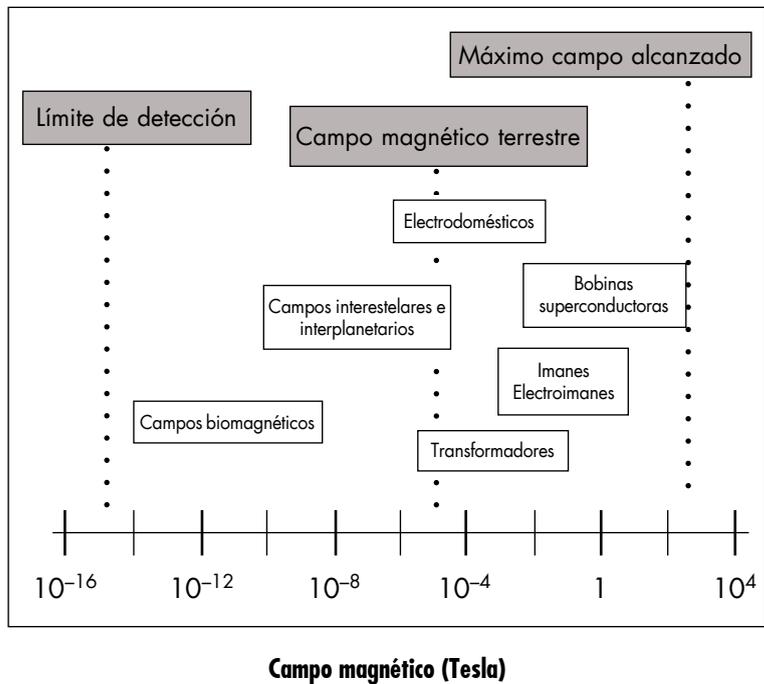
Los sensores inductivos se basan en el efecto de inducción electromagnética, por el cual se induce un voltaje eléctrico en un bobinado cuando varía en el tiempo el flujo magnético recogido por él. Son de amplia aplicación debido a la general sencillez de los artilugios empleados: para sensores excitados por el campo magnético de imanes permanentes, sensores de inducción de voltaje alterno a partir de desplazamiento lineal o de rotación, sensores de corrientes de Foucault e inductores fluxmétricos.

Los sensores de *flux-gate*, a diferencia del caso anterior, miden variaciones absolutas de campo en lugar de sus variaciones en el tiempo. Quizás el caso más empleado es el de los sensores basados en el análisis de la señal de segundo armónico, empleando análisis de Fourier para analizar la señal recogida por un bobinado al aplicar un campo sinusoidal. La respuesta no es lineal debido a la propia falta de linealidad del ciclo de histéresis. La aplicación de un campo continuo adicional origina mayor riqueza de armó-

nicos y, en particular, el segundo armónico varía linealmente con este campo adicional.

Los sensores de tipo Wiegand se basan en el empleo de elementos sensores biestables o de ciclo de histéresis cuadrado. La señal derivada del ciclo es un pico agudo, lo que proporciona voltajes en forma en pico. Se emplean en sensores de frecuencia de rotación y contadores de vueltas, tarjetas codificadas etc.

Los sensores magnetorresistivos se basan en el efecto de magnetorresistencia anisótropa, ya considerado en el caso de lectura de grabación magnética. La resistencia eléctrica depende de la dirección en que se aplica el campo magnético.



**Figura 12**

Campos magnéticos generados por diferentes agentes.

Como ejemplo del amplio rango de posibilidades de detección de magnitudes magnéticas podemos considerar el del propio campo magnético (véase la figura 12). Los campos magnéticos más débiles que pueden ser medidos experimentalmente son los producidos por los seres vivos —campos biomagnéticos, generados por corrientes eléctricas extraordinariamente débiles—, cuyo valor (del orden de  $10^{-14}\text{T}$ ) es solamente detectable mediante los magnetómetros más sensibles, como son los de SQUID (magnetómetro de interferencia cuántica superconductiva). El campo magnético en el espacio alcanza valores del orden de  $10^{-6}\text{T}$ . Los campos magnéticos creados por las líneas de alta tensión y transformadores alcanzan valores de hasta  $10^{-3}\text{T}$  en sus proximidades y son detectables por diversos tipos de magnetómetros de inducción. Los máximos campos creados por imanes permanentes son del orden de  $1\text{T}$  y los campos más intensos alcanzados mediante bobinas superconductoras y los campos pulsados alcanzan  $10-10^2\text{T}$ . Para hacernos una idea de estos órdenes de magnitud, podemos recordar que la intensidad del campo magnético terrestre en España es de aproximadamente  $0,04\text{ mT}$ .

Los materiales empleados como núcleo sensor en los diferentes aparatos depende en cada caso del tipo de sensor. Por ejemplo, se puede precisar materiales por su ciclo de histéresis perfectamente cuadrado, o bien por poseer una anisotropía transversal débil y homogénea, por su alta constante de magnetostricción o por ser ésta prácticamente nula. Los materiales saturables —ciclo de histéresis rectangular— se utilizan en amplificadores magnéticos, relés, magnetómetros, y aplicaciones en computadores y memorias digitales y analógicas, donde se requieren materiales magnéticos cuya imanación pueda alcanzar su saturación bajo campos de baja intensidad.

En sensores para identificación en lectura de tarjetas, validación de monedas y sistemas de seguridad, el principio básico es la codificación de unidades o bits en una secuencia dada que es detectada por los sensores.

A diferencia del caso de los núcleos de máquinas electromagnéticas, en este tipo de aplicaciones las prestaciones técnicas son de la mayor importancia y ahora el coste económico del elemento sensor pasa, en principio, a un segundo plano. Por otra parte, un aspecto importante para la aplicación es la posibilidad de integración de los elementos sensores en el dispositivo global. Desde este punto de vista es de gran relevancia la utilización de técnicas de fabricación adecuadas, en particular el empleo de la electrodeposición —en películas de elevada imanación de saturación y baja coercitividad—, microlitografía, y deposición catódica —para la preparación a escala micro y nanométrica de elementos sensores en forma de hilos o puntos magnéticos.

Finalmente, otra aplicación importante de ciertos materiales duros de mercado muy especializado que merece una mención especial, es la de los actuadores magnetoelásticos. Determinados materiales sufren deformaciones magnetostricativas gigantes del orden de hasta de  $10^{-3}$  bajo la acción de campos magnéticos relativamente no muy intensos (del orden de kOe). Materiales de este tipo son las aleaciones basadas en FeTb que presentan magnetostricción gigante y, en particular, el material por excelencia es el Terfenol ( $\text{Tb}_{0.7}\text{Dy}_{0.3}\text{Fe}_2$ ). Este fenómeno permite la utilización de dichos materiales en aplicaciones como generadores y receptores ultrasónicos, generadores de tensiones mecánicas, inducidas por la acción de campos magnéticos, actuadores para microposicionamiento con cargas pesadas, motores lineales, microactuadores para robótica y medicina,...

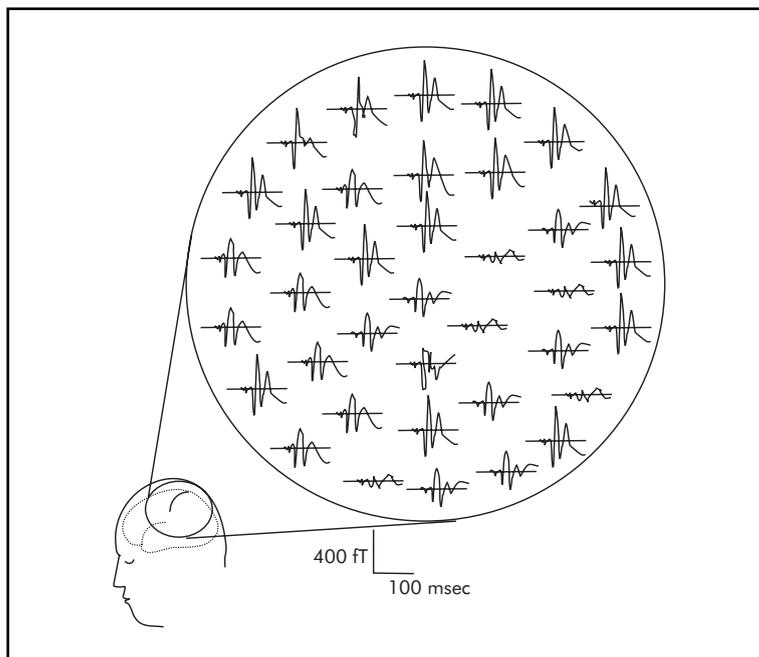
Por último, en este apartado debemos mencionar a una nueva familia de materiales que presentan memoria magnética de forma, es decir, que modifican enormemente sus dimensiones (del orden de partes por mil) bajo la acción de campos magnéticos. Entre las aleaciones más estudiadas está la de NiMnGa.

## **2.6. OTRAS APLICACIONES: BIOMAGNETISMO Y GEOMAGNETISMO, ALTAS FRECUENCIAS**

### **2.6.1. Biomagnetismo**

Los estudios en biomagnetismo y en particular aquellos de carácter biomédico persiguen determinar los efectos magnéticos producidos en los seres vivos por corrientes eléctricas o contaminantes magnéticos. Quizás el aspecto de mayor relevancia es la diagnosis de patologías a partir de efectos magnéticos observables en el exterior del cuerpo. La actividad magnética de los diferentes órganos varía en amplitud y frecuencia de los campos magnéticos generados: así, por ejemplo, contaminantes magnéticos en el hígado pueden dar lugar a campos hasta del orden de  $10^6$ fT en el exterior, los encefalogramas,  $10^3$ fT (ver figura 13) o la actividad cortical en el cerebro del orden de  $10^2$ fT. Estos campos cuya frecuencia no supera los 100 Hz se detectan mediante magnetómetros ultrasensibles tipo microSQUID.

El empleo por numerosos seres vivos de fenómenos magnéticos se está empezando a conocer. Las bacterias magnetotáctiles, por ejemplo, se pueden considerar como pequeños imanes que se desplazan utilizando el campo terrestre como brújula. Las aves migratorias emplean también el campo magnético terrestre como sistema de orientación en sus largos desplazamientos. En general, estos organismos vivos poseen partículas de magnetita en determinadas zonas (el cerebro, en el caso de animales superiores) con las que leen la orientación del campo magnético terrestre. Por otra parte, estudios muy serios han podido demostrar cualitativa y cuantitativamente la influencia de la aplicación de campos magnéticos en la actividad bioeléctrica en neuronas a través de su efecto sobre las membranas. No obstante, la influencia nociva o saludable de la exposición ante campos magnéticos de intensidad poco elevada (inferior a 1T) de los seres vivos y, en particular, sobre el hombre



**Figura 13**

Obtención de la distribución de campos magnéticos en el cerebro: El magnetoencefalograma.

no ha podido ser demostrada, a pesar de la publicidad sobre este asunto, en ocasiones con poco rigor científico.

El uso de moléculas biológicas magnéticas tiene un gran interés en el campo de la clínica y química analítica. Se basa en la especificidad de los anticuerpos en distinguir moléculas similares en mezclas complejas. Así, el uso de partículas magnéticas permite determinar la presencia de antígenos. Otras aplicaciones incluyen la detección de trazas de proteínas asociadas a tumores, o la presencia de contaminantes y toxinas de origen biológico en aguas, alimentos, etc. Por último, cabe mencionar las enormes posibilidades en biomedicina de la utilización de polímeros magnéticos.

### **2.6.2. Geomagnetismo**

El estudio del geomagnetismo, es decir, de los campos magnéticos generados por el planeta tierra es muy antiguo: por ejemplo, desde el Renacimiento hasta la fecha hay consignaciones de la declinación magnética. Pueden dar información acerca de la composición del manto de la tierra, así como de los procesos dinámicos en su interior. Un aspecto de aplicación concreta es el de la exploración mineralógica, como también el de la detección de objetos metálicos enterrados. Otra aplicación de notable importancia es la datación de eras geológicas en paleomagnetismo, dado que partículas magnéticas, fundamentalmente las de magnetita, se orientan espontáneamente en la dirección del campo terrestre, con lo que es posible seguir las variaciones de su dirección a lo largo de dichas eras. Estudios del campo geomagnético y sus perturbaciones permiten también la detección de fenómenos terrestres o cósmicos: los 11 años del ciclo solar, los 27 días de rotación del sol o el día de rotación terrestre.

La magnetometría se ha extendido recientemente a los satélites artificiales e investigación planetaria. En satélites artificiales en órbitas elípticas es obligada la utilización de sensores magnéticos de amplio rango de campo, es decir, de 4 a 140 nT).

### **2.6.3. Altas frecuencias y otras aplicaciones**

Las cerámicas magnéticas tienen una serie de aplicaciones particulares como materiales absorbentes a la radiación electromagnética. Los absorbentes electromagnéticos en el rango de microondas son útiles en telecomunicación de microondas para suprimir interferencias electromagnéticas: por ejemplo, para disminuir la influencia de estructuras metálicas reflectantes que perturban la navegación por radar en puertos y aeropuertos. Determinadas ferritas duras

(hexaferritas de bario dopadas) son embebidas en resinas o pinturas para apantallamiento electromagnético.

Otra aplicación es la separación magnética de sustancias no férricas que se fundamenta en el cambio anómalo de viscosidad de hasta un orden de magnitud con el campo magnético aplicado de una sustancia sólida en suspensión. En el fluido magnético se agregan partículas de magnetita u otras ferritas. Esta técnica se emplea para la separación de sólidos en suspensión especialmente en minería.

## **2.7. LAS ÚLTIMAS TENDENCIAS**

Gracias a los desarrollos y técnicas experimentales más avanzados es posible desarrollar nuevos materiales magnéticos; mas no sólo esto, sino que a veces con ello se posibilita la observación de nuevos fenómenos como, por ejemplo, efectos cuánticos no observados previamente, magnetorresistencia gigante o colossal, etc.

### **2.7.1. Últimos materiales magnéticos y tendencias de futuro**

En la actualidad, algunos de los mayores esfuerzos en investigación tecnológica están encaminados a la fabricación controlada y los métodos de caracterización de sistemas magnéticos a escala atómica o nanométrica, en donde se encuentran, por una parte, nuevas perspectivas tecnológicas de futuro y, por otra, se ponen de manifiesto nuevos fenómenos magnéticos.

La magnetoelectrónica en breve espacio de tiempo está abriendo unas perspectivas de incalculables posibilidades. Se fundamenta en el hecho de sustituir el concepto de transporte de corriente eléctrica mediante el desplazamiento de electrones, ocasionado por la aplicación de

campos eléctricos (tensión eléctrica) por el de transporte generado por electrones con espín polarizado o corrientes de espín (espín up o down) controlable por campos magnéticos internos.

Los efectos de magnetorresistencia se han venido usando en cabezas de lectura magnética en los últimos años. Entre los nuevos efectos en este campo podemos mencionar, en primer lugar, la magnetorresistencia anisótropa (AMR), en la cual la resistencia eléctrica varía cuando la corriente fluye paralela o perpendicularmente a la imantación. Por su parte, el descubrimiento del efecto de magnetorresistencia gigante (GMR), en 1988, por el que se observan grandes variaciones de la resistencia eléctrica —principalmente estudiado en multicapas magnéticas—, ya ha sido incorporado en las cabezas lectoras de sistemas de grabación de alta densidad. Se fundamenta en el hecho de que la resistencia, al paso de una corriente que fluye paralela a las capas magnéticas, es mayor cuando la imanación en las capas adyacentes tiene dirección opuesta frente al caso en que la imanación se orienta paralela en esas capas. La resistencia puede ser, por tanto, alterada mediante la modificación de la orientación de la imanación en las capas por aplicación de un campo magnético, como el generado por los bits de información en el medio magnético que se quieren leer.

Más recientemente, en 1993, en determinados óxidos mixtos con estructura perovskita, se ha podido observar cambios de resistencia realmente colosales (CMR), al sufrir una transformación de aislante a conductor junto al cambio de fase magnético. Estas perovskitas ya estudiadas hace cuarenta años desde otro punto de vista más estructural, presentan esos enormes cambios de resistencia al sustituir parcialmente iones trivalentes por divalentes.

La tendencia más clara observable actualmente es el estudio y preparación de muestras "pequeñas", entendiendo por tales y en función de su dimensión a nanopartículas, nanohilos y superredes magnéticas. De la importancia y

actualidad de estos nuevos materiales se hablará más adelante. Queremos indicar que la fabricación de estos nuevos materiales posibilita, por una parte, el descubrimiento de nuevos fenómenos, algunos de ellos de carácter cuántico, como efectos de túnel macroscópico ya comenzados a descifrar; por otra parte, posibilita también el estudio del micromagnetismo fundamental tanto en el caso de nanopartículas y nanohilos, así como la interacción magnética entre ellos. Por último, obligan a desarrollar paralelamente nuevas técnicas de observación y medida de lo ya fabricado, así como las tecnologías paralelas.

### **2.7.2. Nuevas técnicas de observación y medición a escala nanométrica**

Entre las técnicas de caracterización magnética a corta escala se encuentran diversas microscopías. En primer lugar, hay que mencionar la microscopía de fuerzas magnéticas (MFM), que esencialmente es un microscopio de fuerzas atómicas en las que se emplea la interacción de una punta magnética y el campo generado por la imanación de superficie del material. Su resolución es del orden de 10 nm. Otra microscopía es la de barrido de electrones con análisis de su polarización magnética (SEMPA). El microscopio electrónico de barrido hace incidir un haz de electrones enfocado sobre la muestra y detecta los electrones dispersados. La imanación queda determinada mediante el análisis de la polarización del espín de los electrones secundarios de la muestra y su resolución es de algunas decenas de nm. Estos electrones tienden a polarizarse con espín antiparalelo al de la imanación del material observado.

La microscopía magnética de campo cercano es una variante de un microscopio óptico de campo cercano, con el cual se tiene precisiones superiores al de la longitud de onda de la luz al tomar imágenes a distancias inferiores a esa longitud de onda —normalmente, se tiene la limitación en la re-

solución espacial debida a efectos de difracción—. Se basa en el efecto Kerr magneto-óptico, por el cual se determina los cambios de la polarización de la luz reflejada por el medio magnético que se deba estudiar. Suele emplearse como técnica complementaria a la MFM.

La holografía electrónica permite resolución nanométrica, y se basa en el estudio de la interferencia entre una onda electrónica de referencia y la dispersada por el medio magnético. En concreto, se determina el cambio de fase de la onda del electrón al atravesar la muestra.

Entre los efectos cuánticos mesoscópicos debemos citar el efecto túnel, por el cual se vence la barrera de potencial entre dos estados por efecto cuántico. Este efecto se observa mejor a muy bajas temperaturas en las que se puede obviar la relajación magnética de origen térmico.

El estudio del magnetismo molecular es, por otra parte, de gran importancia especialmente a la hora de investigar estructuras nanométricas. Por ejemplo, es el caso de las proteínas de ferritina tanto naturales como artificiales. Estructuras de imanes moleculares se han encontrado en la apoferritina (capa proteica en cuyo interior se acumula un óxido de hierro de carácter antiferromagnético de modo natural). En el interior de la apoferritina se pueden introducir óxidos ferrimagnéticos (magnetita o maghemita). Un aspecto importante es la posibilidad de contar con moléculas magnéticas (con iones de hierro) aisladas del exterior por ligandos orgánicos. A escala superior, diversas bacterias como la magnetotactil, ya mencionada antes, representan de hecho imanes que pueden ser observados por técnicas de MFM.

# 3

## CAPACIDAD TECNOLÓGICA DE I+D EN ESPAÑA: SITUACIÓN ACTUAL Y PERSPECTIVAS

### 3.1. ASPECTOS EN EL DESARROLLO TECNOLÓGICO

Ante una excitación de carácter magnético —agente que modifica el estado magnético de un material, bien sea directamente un campo magnético, o bien tensiones mecánicas, temperatura, etc.—, todo material responde magnéticamente de forma particularizada. Pues bien, cuando esa *respuesta es extrema*, consideraremos ese material como *candidato potencial* para:

- 1) *sustituir* a algún otro material tecnológico que haya podido quedar obsoleto;
- 2) generar una *nueva tecnología*, o bien, y más frecuentemente,
- 3) introducir una pequeña optimización del rendimiento global incrementando lo que determina algún tipo de *innovación* tecnológica.

De una forma amplia podríamos entender o definir a un material de **interés tecnológico**:

- a) cuando alguna de sus propiedades presenta un carácter magnético extremo en algún sentido, en cuyo caso podremos hablar incluso de material magnético avanzado; o bien

- b) cuando, presentando propiedades magnéticas más modestas aunque suficientemente notables, el conjunto de factores técnico-económicos complementarios le convierte en atractivo desde un punto de vista tecnológico-comercial.

Teniendo en cuenta estos dos aspectos, podríamos distinguir los siguientes pasos y factores relacionados con el desarrollo, innovación y aplicación de un material magnético tecnológico:

- 1) *Existencia misma del material tecnológico.* Este primer punto requerirá la potenciación lo suficientemente notable de las diferentes, y con frecuencia numerosas, técnicas de fabricación y procesado que permiten obtener un material con propiedades óptimas o al menos notables.
- 2) *Capacidad de detección de propiedades magnéticas extremas.* Es decir, en los arriba mencionados materiales magnéticos avanzados, alguna propiedad puede presentar un carácter tan sobresaliente que su detección requiere técnicas novedosas. La potenciación del desarrollo de nuevas tecnologías de medición es, por tanto, del máximo interés para el desarrollo de nuevos o innovadores materiales.
- 3) *Integración en un engranaje tecnológico ya existente o generación de tecnología innovadora.* Evidentemente, el distinto grado de integración en una cadena tecnológica vendrá determinado por el conjunto de factores técnicos y económicos que caracterizan a cada material tecnológico. Lo que es necesario es la existencia de un soporte tecnológico mínimo para que el material magnético pueda rendir unos frutos mínimos aceptables. Hay que potenciar, pues, un ambiente tecnológico suficientemente desarrollado, de modo que suponga un paso más avanzado al de ser meramente suministrador de productos procesados en otro lugar.
- 4) *Existencia de un beneficio último con la utilización*

*práctica del material magnético.* Es decir, debe existir claramente un beneficio económico y/o social mínimo que justifique la potenciación de los pasos previos. Usualmente, la rentabilidad es proporcionalmente mayor cuando se realiza una planificación al menos a medio plazo. Esto es consecuencia de la consolidación de una línea de trabajo que permite tener en cuenta los distintos pasos antes mencionados.

En definitiva, todos estos factores para el descubrimiento final y utilización de un material tecnológico sobresaliente o innovador pueden requerir en determinados momentos una componente de originalidad notable. Esta componente no obstante surge una vez que exista:

- a) personal diferenciado con cualificación científico-tecnológico-profesional que pueda desarrollar su labor continuamente, y
- b) un entramado tecnológico-industrial suficientemente denso.

Ambos aspectos están íntimamente relacionados y es difícil entender el desarrollo de uno sin el otro. Su potenciación mutua requiere amplitud de miras, confianza mutua y generosidad por las partes científica, económico-industrial, e incluso de visión y planificación política. Este tipo de planteamientos de fondo debieran ser tratados probablemente en mayor profundidad en otros foros.

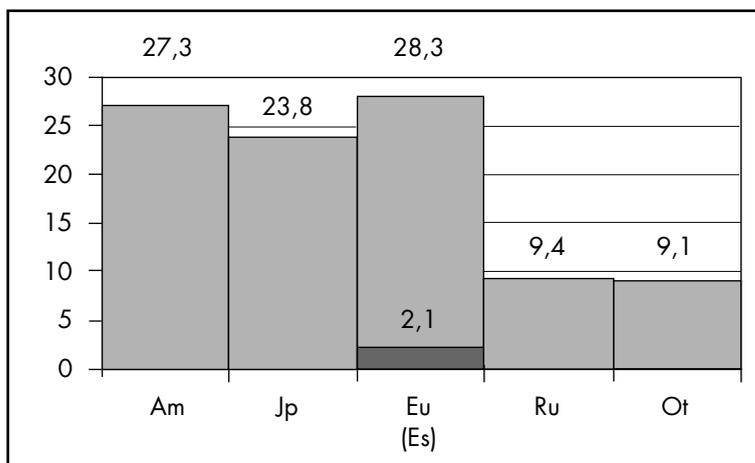
### **3.2. PANORAMA CIENTÍFICO-TECNOLÓGICO ACTUAL**

Existe una cierta convención en España según la cual la actividad de investigación científica, si bien puede tener un cierto interés intrínseco, nunca ha estado ni imbricada en la sociedad en su conjunto, ni ha sido reconocida sino como algo poco más que la actividad de "sabios distraídos". Es

un hecho que tradicionalmente la actividad investigadora de la Universidad, el CSIC, y otros organismos de investigación se ha centrado en aspectos básicos, o incluso puramente organizativos o directivos en perjuicio de los aspectos estrictamente tecnológicos. Este hecho experimental se está modificando en los últimos años, quizás un par de decenios, hacia una tendencia de promoción de estudios tecnológicos aplicados. Esto se puede entender como consecuencia probablemente de la propia transformación en la sociedad española en su conjunto hacia una mayor conexión con países vecinos europeos en donde existe una superior experiencia tecnológica.

Para poder analizar en cierto detalle el panorama científico tecnológico del magnetismo español actual, veamos en primer lugar cuál es el panorama internacional. Para ello, se ha realizado un estudio acerca de cuáles son los temas de actualidad en materiales magnéticos y su distribución por países. Se han contabilizado las comunicaciones científico-tecnológicas presentadas en algunos de los congresos internacionales sobre temas de magnetismo y materiales magnéticos de mayor prestigio, como son: *International Conference on Magnetism (ICM)*, *INTERMAG*, *European Magnetic Materials and Applications Conference (EMMA)* y *Annual Conferences on Magnetism and Magnetic Materials (MMM)*, en USA); asimismo, se han considerado las comunicaciones presentadas en el volumen especial número 200 de la revista *J.Magn.Magn.Mat.* Este estudio se ha realizado en el periodo entre 1990 y 1999 y comprende un total de más de cinco mil trabajos presentados.

En la figura 14 se ha representado la distribución por países o, mejor, por zonas de influencia, del porcentaje total de trabajos. En cada trabajo considerado, se ha tomado el país al que pertenece el laboratorio del primer autor. Como se puede observar Estados Unidos y Canadá (Am), y Japón (Jp), por sí solos aportan un número de contribuciones que sumadas es superior al 50%. Esto es un claro índice de la potencia investigadora de estos países en prácticamente



**Figura 14**

Distribución por países de la actividad investigadora en magnetismo.

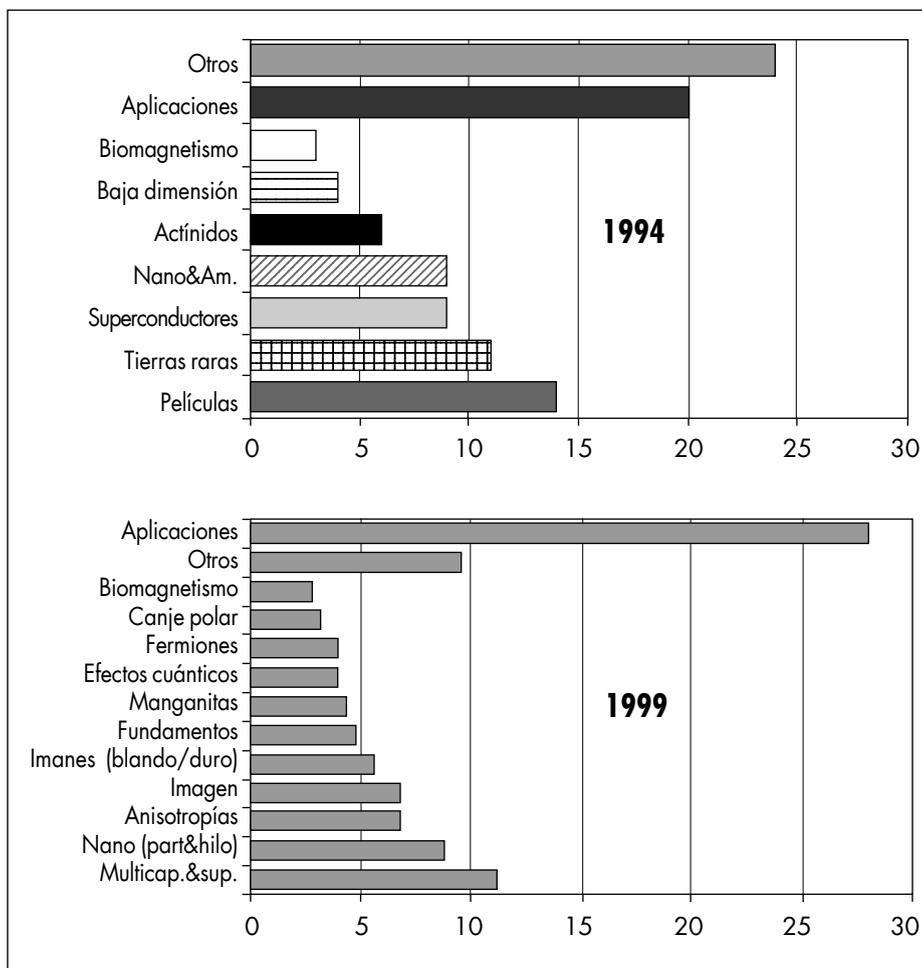
todos los aspectos relacionados con el magnetismo. Europa (EU, entendiendo por tal a los países de la Comunidad Europea junto con el resto de países del antiguo bloque occidental) suma un porcentaje (28,3%) del mismo orden al de los grupos anteriores. Dentro de estos países las aportaciones más notables son las de Alemania, Reino Unido y Francia, con porcentajes del 7, 6 y 5%, respectivamente. En el caso de España, su aportación es aproximadamente del 2%, lo que corresponde aproximadamente al 8% de la europea. El resto de países europeos (Ru, entendiendo por tales Rusia y el conjunto de países de influencia de la antigua Unión Soviética), y el resto de países del mundo (Ot) aportan cada uno un porcentaje que no alcanza el 10%.

Analizando con más detalle la tendencia temporal, podemos indicar que estos porcentajes se han mantenido prácticamente constantes a lo largo del decenio considerado. En el caso español se observa una cierta tendencia de crecimiento, puesto que en el primer periodo (1990-1993) el índice es 2,1% de la producción mundial, mientras que en

último trienio (1997-1999) éste ha subido a 2,4%. Esta participación española cabe ser calificada posiblemente de bastante digna dentro de los parámetros globales en los que se mueve la investigación. Podemos afirmar que la presencia española en este tipo de congresos internacionales es continua y prácticamente amplia en los distintos temas de investigación —sobre esto se comentará más adelante—, además de extensiva a comités organizadores, presidencia de sesiones, revisores y contribuciones invitadas.

Obviamente, en los mencionados congresos se cubren los numerosos campos de investigación científico tecnológica relacionados con el magnetismo y los materiales magnéticos, por lo que su enumeración resultaría prolija y además no aportaría información clara, puesto que al fin y al cabo se engloban todos los aspectos que hemos descrito en el capítulo anterior. Más interesante es la determinación de aquellos temas que presentan lo que podemos denominar un mayor índice de impacto científico-tecnológico. Para evaluar estos temas, se han considerado en las mencionadas reuniones internacionales los títulos de las contribuciones invitadas, bien sean en las sesiones convencionales como en los *symposia*, que engloban aspectos de la mayor actualidad, incluidos en esos congresos. El número total de contribuciones considerado es superior a 600 y, en este caso, vamos a representar el resultado en dos apartados (figura 15), correspondiendo, respectivamente, al primer quinquenio (1990-1994) y al segundo (1995-1999), dado que ello va a permitir comprobar una cierta evolución en cuanto a los temas de mayor impacto.

En el primer periodo, se comprueba que el tema de mayor relevancia y actualidad es el de investigación en magnetismo de películas delgadas, multicapas magnéticas, superredes y, en general, magnetismo de superficie. Los problemas que suscitan mayor interés son los siguientes: acoplamiento magnético entre capas, magnetorresistencia gigante, anisotropías magnéticas, efectos magnetoópticos y magnetoelásticos, y dominios magnéticos, paredes y líneas de Bloch. La resolu-



**Figura 15**

Temas de impacto investigador en los periodos 1990-1994 (a), y 1995-1999 (b).

ción de estos problemas, fundamentalmente de carácter básico, es de gran interés para los aspectos tecnológicos, de modo especial para los relacionados con el almacenamiento de información y grabación magnética.

El siguiente grupo de temas también presentaban gran actualidad. En primer lugar, el relativo a aleaciones de tierras raras, en gran medida gracias a su conexión con las tecnologías asociadas al desarrollo de imanes permanentes. Entre los aspectos más destacables podemos citar: nitrogenación, reorientación de espín, acoplamiento magnético entre granos, etc. Asimismo, hay que destacar los estudios sobre superconductores de alta temperatura crítica, donde alguno de los objetivos perseguidos se pueden resumir en: búsqueda de compuestos con temperatura crítica superior, desarrollo de conductores filiformes o bien aspectos más teóricos relativos a vórtices, corriente crítica o campos críticos. Otro aspecto relevante es el de los materiales con estructura desordenada o bien multifásica con tamaño de grano reducido. Dentro de este capítulo constituyen la contribución más notable los materiales con estructura amorfa y nanocristalina, así como los denominados sólidos granulares. Dentro de este grupo se puede decir que, en el periodo considerado, los sólidos granulares —constituidos por aleaciones de elementos inmiscibles que segregan en sistemas multifásicos tras ser sometidos a tratamientos térmicos— y los materiales nanocristalinos —desvitrificados parcialmente a partir de una fase amorfa precursora— presentaron cierto carácter emergente, mientras que los materiales amorfos ya eran estudiados sistemáticamente con anterioridad.

A continuación aparecen otros temas con porcentaje un poco inferior, pero con gran crecimiento relativo en este periodo. Están, en primer lugar, los estudios sobre compuestos de actínidos, fermiones pesados, efecto Kondo, englobados en el apartado de los actínidos; siguen los sistemas de baja dimensionalidad y temas relacionados con magnetismo de seres vivos y magnetismo molecular. Aparecen también numerosas comunicaciones invitadas que son de difícil adscripción a uno de los apartados anteriores o porque cubren aspectos ligados a diversos aspectos antes mencionados y cuya contribución porcentual alcanza casi el 24%. Por últi-

mo, una serie de trabajos se refieren directamente a aplicaciones tecnológicas, el 20%, y requieren un comentario particularizado que se verá posteriormente; pero antes veamos el resultado del estudio para el segundo quinquenio, periodo 1995-1999.

Se indican en este caso con mayor detalle los temas de mayor impacto actual. En primer lugar sigue apareciendo la investigación en multicapas magnéticas y, en general, el magnetismo de superficie (11,2%). Aparece claramente un tema novedoso en segundo lugar, como es el del magnetismo de sistemas pequeños, o de baja dimensionalidad si se quiere, englobando nanopartículas, nanohilos, etc., así como sus interacciones (8,8%). A continuación aparece una serie de temas como los relativos a anisotropías magnéticas y magnetostricción (6,8%), nuevas técnicas de imagen y determinación de la distribución de los momentos magnéticos (6,8%), e imanes (*spring magnets*, interacción blando/duro). Los aspectos de investigación fundamental siguen atrayendo un notable interés (4,8%): transiciones de fase, ondas de espín, magnetismo itinerante,... Quizás el tema de mayor incremento de interés ha sido el relacionado con la magnetorresistencia colosal y su observación en manganitas (4,4%), si bien el pico de máximo impacto se produjo hace ya al menos tres años. Crece el interés en el magnetismo cuántico (4,0%), debido tal vez a las nuevas posibilidades de estudio en sistemas nanoescalados. Se mantiene el estudio en fermiones pesados y actinidos (4,0%), y biomagnetismo y magnetismo molecular (3,0%), además de hacerse presente un nuevo tema de interés, como es el del efecto polarizador de canje (*exchange biasing*) (2,8%). En el apartado "otros" se engloba un 9,6 % y, por último, los temas de aplicaciones representan el 28,0%.

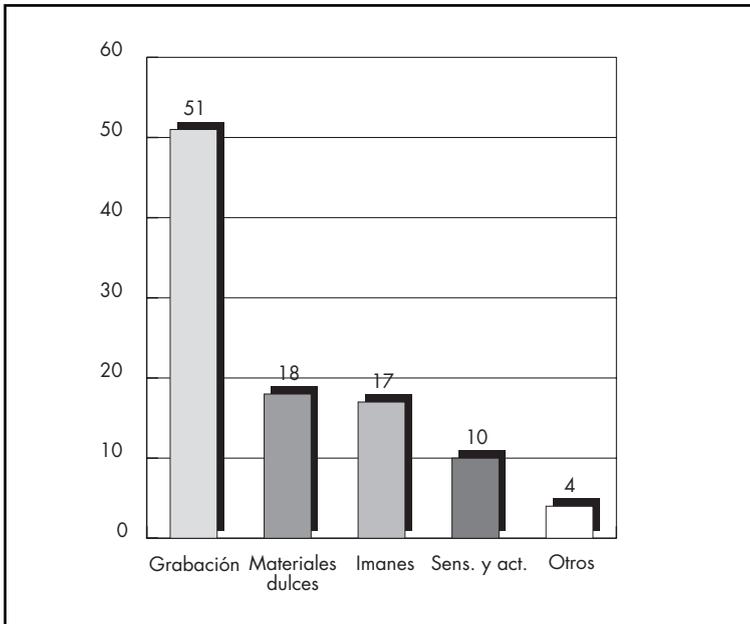
Nos vamos a permitir unos mínimos comentarios que no pretenden en absoluto enjuiciar ningún tipo de investigación, sino sólo extraer una mínima información estadística.

En cuanto a los temas que comparativamente han reducido su impacto, deberíamos citar:

- 1) La investigación en materiales superconductores de alta temperatura cuyos investigadores se han trasladado en parte al tema de óxidos mixtos.
- 2) Algunos aspectos del magnetismo de amorfos y sistemas desordenados, posiblemente debido al desplazamiento hacia áreas de mayor aplicación tecnológica.

*Han incrementado su impacto (no en valores absolutos):*

- 1) Los materiales de escala nanométrica, sus interacciones y la visualización de sus características.
- 2) Los ya citados óxidos mixtos y los fenómenos relativos a la magnetorresistencia colosal. No cabe duda de todas formas que la investigación de mayor impacto sigue siendo la que se realiza en materiales como multicapas magnéticas y similares, debido a su interés



**Figura 16**

Temas de investigación tecnológica que atraen mayor relevancia actual.

tanto básico como aplicado y, también, por la enorme inversión que se realiza en estos momentos en todos los países avanzados.

En la figura 16 se presentan los temas de investigación tecnológica que en el decenio considerado atrajeron interés suficiente como para ser temas invitados en las citadas conferencias, y que en un porcentaje conjunto ascienden a 26%. Se presentan resultados para el global del periodo considerado, 1990-1999, dado que en este caso las variaciones entre el primer y segundo quinquenio son menos importantes que en el caso de temas de investigación más fundamental antes considerado.

Del porcentaje de publicaciones sobre aplicaciones es necesario mencionar los siguientes aspectos:

En primer lugar, lo que atrae mayor interés son sin duda los temas relacionados con la grabación magnética, alcanzando un 51% del total. Los distintos aspectos que se consideran son: cabezas grabadoras de MR y GMR, válvulas de espín cabezas inductivas con multicapas, efectos térmicos, viscosidad magnética y relajación en medios de grabación, tribología de intercara medio-cabeza, grabación de ultra-alta densidad. Es difícil hacer una separación porcentual dentro de estos temas mencionados, dado que en gran parte se encuentran entremezclados entre ellos. Sin embargo, las siguientes palabras claves en este campo tecnológico representan el mayor impacto actual: *magneto-electrónica*, *tecnología híbrida integrada semiconductor/magnético*, *magnetic random access memory (MRAM)*, *spin polarized*, *tunnel junction*,...

Luego aparecen tres grandes apartados que, de acuerdo con las secciones anteriores, se pueden englobar como temas relativos a materiales blandos, duros, y sensores y actuadores. Los temas tecnológicos relativos a materiales blandos alcanzan el 18% del total y se refieren principalmente a aceros mejorados para chapa de transformador, estudios de pérdidas en diversos tipos de transformadores bien sea experimentalmente o por simulación, ferritas blan-

das y su empleo en componentes electrónicos, fundamentalmente en altas frecuencias, muy diversos procesados con objeto de obtener materiales blandos con forma y propiedades adecuadas, etc. En lo que se refiere a imanes se llega al 17% y algunos de los temas tratados son utilización de imanes en motores y dispositivos muy diversos, nuevos procesados para mejorar la capacidad de imanes de tierras raras,...

Los temas relativos a sensores magnéticos —sin incluir los aplicados en grabación magnética— y actuadores alcanzan el 10%. Estos sensores hacen uso de una amplia variedad de fenómenos y con gran amplitud de magnitudes a detectar —campo magnético, presión, temperatura, rotación, aceleración, posición, ...—, e incluyen también un reciente apartado que podría denominarse biosensores o sensores relacionados con el magnetismo de seres vivos y que representan un 2%.

Además de estos grandes grupos, aparecen otros temas (4%) de electromagnetismo clásico y altas frecuencias —principalmente empleando ferritas y granates—, separación magnética, etc.

Por último, un comentario respecto a las fuentes que hemos utilizado para la obtención de estas estadísticas es que con frecuencia las conferencias organizadas en USA o por organismos americanos, por una parte, suelen estar doblemente polarizados hacia la investigación en magnetismo de multicapas y similares y, por otra, hacia las aplicaciones tecnológicas derivadas de las mismas, si bien en este caso se debe incluir también a Japón. Sin embargo, las conferencias organizadas por organismos y/o investigadores europeos suelen tender en mayor porcentaje a un magnetismo más básico que engloban áreas más amplias de temas de magnetismo.

### 3.3. IDENTIFICACIÓN DE CENTROS DE INVESTIGACIÓN FUNDAMENTAL

Una vez presentado el panorama científico-tecnológico global, veamos cuáles son los grupos de actividades que se desarrollan en nuestro entorno más cercano. Para ello, pasamos a identificar los distintos centros de universidades e institutos del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, en donde se realiza investigación básica o aplicada en magnetismo y materiales magnéticos, haciendo mención de los responsables de los grupos investigadores y, de forma resumida, de las palabras claves que parecen más definitorias de su tema de trabajo.

#### **Universidad de Santiago de Compostela**

Página web: [www.usc.es](http://www.usc.es)

**J. Rivas**                      **Partículas magnéticas, óxidos magnéticos (perovskitas, espinelas)**  
Dirección:                      Laboratorio de Magnetismo  
  Campus Universitario  
  15706 Santiago de Compostela  
  (A Coruña)  
Teléf.:                            (+34) 981 56 31 00, extensión 402  
Fax:                                +34) 981 52 06 76  
e-mail:                            farivas@usc.es

**F. Vidal**                        **Superconductividad, transiciones de fase**  
Dirección:                      Laboratorio de Física de Materiales  
  Campus Sur  
  15706 Santiago de Compostela  
  (A Coruña)  
Teléf.:                            (+34) 981 56 31 00, extensión 4019  
Fax:                                (+34) 981 53 16 82  
e-mail:                            fmvidal@usc.es

## **Universidad de Oviedo**

Página web: [www.uniovi.es](http://www.uniovi.es)

Dirección: Departamento de Física  
Campus de Llamaquique  
Calvo Sotelo, s/n.  
33005 Oviedo

Teléf.: (+34) 985 10 40 83

Fax: (+34) 985 22 62 54

**M. Tejedor**      **Dominios magnéticos, magnetoimpedancia**

e-mail: [tejedor@pinon.ccu.uniovi.es](mailto:tejedor@pinon.ccu.uniovi.es)

**B. Hernando**      **Dominios magnéticos, magnetoimpedancia**

e-mail: [grande@pinon.ccu.uniovi.es](mailto:grande@pinon.ccu.uniovi.es)

**J. Alameda**      **Películas delgadas**

e-mail: [alameda@string1.ciencias.uniovi.es](mailto:alameda@string1.ciencias.uniovi.es)

**J. Blanco**

e-mail: [jablanco@correo.uniovi.es](mailto:jablanco@correo.uniovi.es)

## **Universidad de Cantabria**

Página web: [www.unicam.es](http://www.unicam.es)

Dirección: Departamento de Física de la Materia  
Condensada

Avda. de los Castros, s/n.

39005 Santander

Teléf.: (+34) 942 20 15 06

Fax: (+34) 942 20 14 02

**J. Gómez-Sal**      **Tierras raras y actínidos, resistividad**

e-mail: [gomezjc@unican.es](mailto:gomezjc@unican.es)

## **Universidad del País Vasco**

Página web: [www.ehu.es](http://www.ehu.es)

### **J. M. Barandiarán Estructuras, anisotropías, resonancias, GMR**

Dirección: Departamento de Electricidad y Electrónica  
Universidad del País Vasco (UPV/EHU)  
Apartado 644  
Bilbao (Vizcaya)  
Teléf.: (+34) 946 01 25 49  
Fax: (+34) 946 01 30 71  
e-mail: [manub@we.lc.ehu.es](mailto:manub@we.lc.ehu.es)

### **F. Plazaola Estructuras, anisotropías, resonancias, GMR**

Dirección: Departamento de Electricidad y Electrónica  
Universidad del País Vasco (UPV/EHU)  
Apartado 644  
48080 Bilbao (Vizcaya)  
Teléf.: (+34) 946 01 25 49  
Fax: (+34) 946 01 30 71  
e-mail: [fernando@we.lc.ehu.es](mailto:fernando@we.lc.ehu.es)

### **J. González Anisotropías inducidas, magnetoelasticidad**

Dirección: Grupo de Magnetismo del Departamento  
de Física de Materiales  
Apartado 1072  
20080 San Sebastián (Guipúzcoa)  
Teléf.: (+34) 943 21 66 00  
Fax: (+34) 943 21 22 36  
e-mail: [wapgoesj@sq.ehu.es](mailto:wapgoesj@sq.ehu.es)

## **Universidad Pública de Navarra**

Página web: [www.unav.es](http://www.unav.es)  
Dirección: Edificio Los Castaños  
Irunlarrea, s/n.  
31080 Pamplona (Navarra)  
Teléf.: (+34) 948 42 56 00  
Fax: (+34) 948 42 56 49

### **V. Madurga Aleaciones amorfas, magnetotransporte**

Teléf.: (+34) 948 16 95 71  
Fax: (+34) 948 16 95 65  
e-mail: [vmadurga@unavarra.es](mailto:vmadurga@unavarra.es)

### **C. Gómez-Polo Magnetoimpedancia, nanocristales**

Teléf.: (+34) 948 16 95 76  
Fax: (+34) 948 16 95 65  
e-mail: [gpolo@unavarra.es](mailto:gpolo@unavarra.es)

## **Universidad Central de Barcelona**

Página web: [www.ffn.ub.es](http://www.ffn.ub.es)  
Dirección: Facultad de Física y Química  
Martí i Franquès, 1  
08028 Barcelona

### **J. Tejada Efecto túnel magnético, efectos cuánticos macroscópicos**

Teléf.: (+34) 934 02 11 58  
Fax: (+34) 934 02 11 49  
e-mail: [jtejada@ffn.ub.es](mailto:jtejada@ffn.ub.es)

### **X. Batlle Nanopartículas, nanocristales**

Teléf.: (+34) 934 02 11 72  
Fax: (+34) 934 02 11 49  
e-mail: [xavier@ffn.ub.es](mailto:xavier@ffn.ub.es)

**A. Labarta**      **Nanopartículas, nanocristales**  
Teléf.:            (+34) 934 02 11 65  
Fax:                (+34) 934 02 11 49  
e-mail:            amilcar@ffn.ub.es

**N. Clavaguera**    **Ingeniería de materiales, calorimetría**  
Teléf.:            (+34) 934 02 11 82  
Fax:                (+34) 934 02 11 98  
e-mail:            narcis@ecm.ub.es

### **Universidad Autónoma de Barcelona**

Página web:      [www.uab.es](http://www.uab.es)  
Dirección:        Departamento de Física  
                      08193 Bellaterra (Cerdanyola del Vallès)  
Teléf.:            (+34) 935 81 21 77  
Fax:                (+34) 935 81 21 55

**J. Muñoz**            **Imanes**  
                      Extensión 1667  
e-mail:            juansantiago.munoz@uab.es

**M. T. Mora**         **Relajación estructural**  
                      Extensión 1564  
e-mail:            teresa.mora@uab.es

**M. D. Baró**         **Relajación, nanocristales**  
                      Extensión 1657  
e-mail:            dolors.baro@uab.es

### **Universidad Complutense de Madrid**

Página web:      [www.ucm.com](http://www.ucm.com)  
Dirección:        Departamento de Física de Materiales.  
                      Facultad Ciencias Físicas  
                      Universidad Complutense de Madrid  
                      Avenida Complutense, s/n.  
                      28040 Madrid

Teléf.: (+34) 91 394 51 94  
Fax: (+34) 91 394 45 47  
e-mail: secre@material.fis.ucm.es

**J. L. Vicent**      **Multicapas magnéticas, superconductividad**

Teléf.: (+34) 91 394 45 58/ 59  
e-mail: jlvicent@fis.ucm.es

**E. López**      **Aleaciones amorfas, sensores**

Teléf.: (+34) 91 394 45 49  
e-mail: elolopez@fis.ucm.es

**M. C. Sánchez**      **Aleaciones amorfas, sensores**

Teléf.: (+34) 91 394 45 41  
Fax: (+34) 91 394 45 47  
e-mail: santruji@fis.ucm.es

## **Universidad de Salamanca**

Página web: [www.usal.es](http://www.usal.es)  
Dirección: Grupo de Magnetismo  
Plaza de la Merced, s/n.  
37071 Salamanca

Teléf.: (+34) 923 29 44 00  
Fax: (+34) 923 29 45 85

**J. I. Íñiguez**      **Ferritas blandas, relajación magnética**

Teléf.: (+34) 923 29 45 00, extensión 1301  
Fax: (+34) 923 29 45 84  
e-mail: nacho@usal.es

## **Universidad de Valladolid**

Página web: [www.uva.es](http://www.uva.es)

**C. Balbás**                    **Teoría**  
Dirección:                    Unidad Profesorado  
   Paseo Prado de la Magdalena, s/n.  
   47005 Valladolid  
Teléf.:                        (+34) 983 42 31 44  
e-mail:                        balbas@lcb.fam.cie.uva.es

**C. de Francisco**            **Ferritas, relajación**  
Dirección:                    Laboratorio de Magnetismo  
   Paseo Prado de la Magdalena, s/n.  
   47071 Valladolid  
Teléf.:                        (+34) 983 42 32 21  
Fax:                            (+34) 983 42 32 17  
e-mail:                        carlos@ee.uva.es

### **Universidad de Castilla-La Mancha**

Página web:                [www.uclm.es](http://www.uclm.es)  
Dirección:                    Departamento de Física Aplicada  
   Facultad de Ciencias Químicas  
   Avda. Camilo José Cela 10  
   13071 Ciudad Real  
Teléf.:                        (+34) 926 29 53 00, extensión 3480  
Fax:                            (+34) 926 29 53 18

**J. M. Riveiro**                **Electrodeposición, aleado mecánico**  
e-mail:                        Manuel.Riveiro@uclm.es

### **Universidad de Cádiz**

Página web:                [www.uca.es](http://www.uca.es)  
Dirección:                    M.<sup>a</sup> Carmen Barrera Solano  
   Ancha, 16  
   11001 Cádiz  
Teléf.:                        (+34) 956 01 50 00

**M. Domínguez** **Magnetorresistencia colosal**  
e-mail: manolo.dominguez@uca.es

### **Universidad de Valencia**

Página web: [www.uv.es](http://www.uv.es)  
Dirección: Departamento de Química Inorgánica  
Universidad de Valencia  
Dr. Moliner, 50  
46100 Burjassot (Valencia)  
Teléf.: (+34) 963 54 44 15  
Fax: (+34) 963-544415

**E. Coronado** **Materiales magnéticos moleculares y poliméricos**  
e-mail: eugenio.coronado@uv.es

### **Universidad Autónoma de Madrid**

Página web: [www.uam.es](http://www.uam.es)  
Dirección: Departamento de Física de la Materia Condensada  
Módulo C-III  
Facultad de Ciencias  
Universidad Autónoma de Madrid  
Avda. Francisco Tomás y Valiente, s/n.  
Cantoblanco 28049 (Madrid)  
Teléf.: (+34) 91 397 47 40

**R. Miranda** **Superredes magnéticas**  
Teléf.: (+34) 913-974737  
e-mail: rodolfo.miranda@uam.es

**A. Baró** **Microscopía de fuerzas**  
Teléf.: (+34) 91 397 47 45  
Fax: (+34) 91 397 39 61  
e-mail: arturo.baro@uam.es

**S. Vieira**                    **Bajas temperaturas, capacidad calorífica**  
Teléf.:                    (+34) 913-974735  
Fax:                        (+34) 913-973961  
e-mail:                    sebastian.vieira@uam.es

**R. Villar**                    **Bajas temperaturas, capacidad calorífica**  
Teléf.:                    (+34) 91 397 40 20  
Fax:                        (+34) 91 397 39 70  
e-mail:                    raul.villar@uam.es

### **Universidad de Zaragoza / ICMA (CSIC)**

Página web:            [www.unizar.es](http://www.unizar.es)

**a)**                            **Facultad de Ciencias**  
Departamento de Física de la Materia Condensada  
Área de Física de la Materia Condensada  
Dirección:                Universidad de Zaragoza  
Pedro Cerbuna, 12  
50009 Zaragoza  
Teléf.:                    (+34) 976 76 10 01

**A. del Moral**            **Tierras raras, magnetostricción, superredes,**  
Teléf.:                    (+34) 976-761216  
Fax:                        (+34) 976-761229  
e-mail:                    delmoral@cc.unizar.es

**R. Ibarra**                    **Magnetorresistencia colosal, tierras raras**  
Teléf.:                    (+34) 976 76 12 15  
Fax:                        (+34) 976 76 12 29  
e-mail:                    ibarra@posta.unizar.es

**b) Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón**

Dirección: Plaza San Francisco, s/n.  
50009 Zaragoza  
Teléf.: (+34) 976 76 12 31; 976 76 24 53  
Fax: (+34) 976 76 12 29

**R. Burriel Efectos magnetotérmicos**  
Teléf.: (+34) 976 76 12 23  
e-mail: burriel@posta.unizar.es

**J. Bartolomé Compuestos intermetálicos**  
Teléf.: (+34) 976 76 12 18  
e-mail: barto@posta.unizar.es

**F. Palacio Magnetismo molecular**  
Teléf.: (+34) 976 76 12 27  
e-mail: palacio@posta.unizar.es

**Universidad de Sevilla / ICMA (CSIC)**

Página web: [www.us.es](http://www.us.es)  
Grupo de investigación: Sólidos no cristalinos  
Física de la Materia Condensada  
Facultad de Física  
Dirección: Avda. Reina Mercedes, s/n.  
41012 Sevilla  
Teléf.: (+34) 954 55 28 86  
Fax: (+34) 954 61 20 97

**A. Conde Aleaciones nanocristalinas**  
Teléf.: (+34) 954 55 28 85  
e-mail: conde@us.es

## **Instituto de Magnetismo Aplicado (UCM/ RENFE/CSIC)**

Página web: [www.ucm.es](http://www.ucm.es)  
Instituto de Magnetismo Aplicado  
Laboratorio Salvador Velayos  
Apartado de correos 155  
Dirección: Ctra. Nacional VI, km 22,500  
28230 Las Rozas (Madrid)  
Teléf.: (+34) 91 300 71 73  
Fax: (+34) 91 300 71 76

**A. Hernando**      **Nanoestructuras y nanocristales magnéticos**  
e-mail: [ahernando@renfe.es](mailto:ahernando@renfe.es)

**G. Rivero**      **Sensores magnéticos**  
e-mail: [grivero@renfe.es](mailto:grivero@renfe.es)

**P. Crespo**      **Aleado mecánico, nanocristales**  
e-mail: [crespo@pinar1.csic.es](mailto:crespo@pinar1.csic.es)

**J. Calbet, M. Vallet, J. Alonso - Perovskitas**  
e-mail: [jgcalbet@quim.ucm.es](mailto:jgcalbet@quim.ucm.es)  
[vallet@farm.ucm.es](mailto:vallet@farm.ucm.es)  
[josea@renfe.es](mailto:josea@renfe.es)

## **Instituto Nacional de Microelectrónica de Madrid (CSIC)**

Página web: [www.imm.cnm.csic.es](http://www.imm.cnm.csic.es)  
Dirección: Isaac Newton, 8 (PTM)  
28760 Tres Cantos (Madrid)  
Teléf.: (+34) 91 806 07 00  
Fax: (+34) 91 806 07 01

**F. Briones**      **Magnetoóptica, nanoestructuras**  
e-mail: [briones@imm.cnm.csic.es](mailto:briones@imm.cnm.csic.es)  
Teléf.: (+34) 91 806 07 02, extensión 150

## **Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona (CSIC)**

Página web: [www.dicat.csic.es/mbeesp.html](http://www.dicat.csic.es/mbeesp.html)  
Dirección: Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona  
Consejo Superior de Investigaciones Científicas  
Campus de la Universitat Autònoma de Barcelona  
08193 Bellaterra (Barcelona)  
Teléf.: (+34) 93 580 18 53  
Fax: (+34) 935-805729

**X. Obradors**      **Superconductividad**  
e-mail: [obradors@icmab.es](mailto:obradors@icmab.es)

**J. Fontcuberta**      **Magnetorresistencia gigante**  
e-mail: [fontcuberta@icmab.es](mailto:fontcuberta@icmab.es)

## **Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (CSIC)**

Página web: [www.icmm.csic.es](http://www.icmm.csic.es)  
Dirección: Grupo de Materiales Magnéticos  
Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid - CSIC  
Cantoblanco  
28049 Madrid  
Teléf.: (+34) 91 334 90 52  
Fax: (+34) 91 372 06 23

**M. Vázquez**      **Hilos magnéticos**  
e-mail: [mvazquez@icmm.csic.es](mailto:mvazquez@icmm.csic.es)

**J. M. González**      **Relajación magnética, micromagnetismo**  
e-mail: [jesus.m.gonzalez@icmm.csic.es](mailto:jesus.m.gonzalez@icmm.csic.es)

**J. L. Martínez**      **Susceptibilidad magnética, perovskitas**  
e-mail:                martinez@icmm.csic.es

**F. Batallán**            **Magnetotransporte**  
e-mail:                batallan@icmm.csic.es

**J. C. Serna, P. Morales - Nanopartículas magnéticas**  
e-mail:                cjserna@icmm.csic.es

### **Instituto de Física Aplicada (CSIC)**

Página web:        www.ifa.csic.es  
Dirección:         Serrano 144  
                        28006 Madrid  
Teléf.:              (+34) 91 561 88 06  
Fax:                 (+34) 91 411 76 51

**N. Garcia**             **Sistemas pequeños**  
e-mail:                nicolas.garcia@fsp.csic.es

### **ETSII (Universidad de Oviedo)**

Página web:        www.etsiig.uniovi.es  
Dirección:         Escuela Técnica Superior de Ingenieros  
                        Industriales e Ingenieros Informáticos  
                        Campus Universitario  
                        33203 Gijón (Asturias)  
Teléf.:              (+34) 985 18 20 08  
Fax                 (+34) 985 18 21 50

**J. Sebastián**        **Elementos para convertidores de potencia**  
Teléf.:              (+34) 985 18 20 85/ 2087  
e-mail:                sebas@ate.uniovi.es

## **ETSIT (Universidad Politécnica Valencia)**

Página web: [www.etsit.upv.es](http://www.etsit.upv.es)  
Dirección: Universidad Politécnica de Valencia  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de  
Telecomunicación  
Camino de Vera, s/n.  
46020 Valencia

Teléf.: (+34) 96 387 71 91, extensión 71911  
Fax: (+34) 96 387 73 09, extensión 77309

**E. de los Reyes** **Microondas**  
e-mail: [ereyes@ocom.upv.es](mailto:ereyes@ocom.upv.es)

**H. García-Miquel** - **Magnetoimpedancia**  
e-mail: [hgmiquel@eln.upv.es](mailto:hgmiquel@eln.upv.es)

## **ETSIT (Universidad Politécnica de Madrid)**

Página web: [www.etsit.upm.es](http://www.etsit.upm.es)  
Dirección: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de  
Telecomunicación  
Ciudad Universitaria, s/n.  
28040. Madrid  
Teléf.: (+34) 91 336 7 2 71

**C. Aroca** **Sensores**  
Teléf.: (+34) 91 549 57 00, extensión 232  
e-mail: [caroca@fis.upm.es](mailto:caroca@fis.upm.es)

**P. Sánchez** **Sensores**  
Teléf.: (+34) 91 549 57 00, extensión 232  
e-mail: [psanchez@fis.upm.es](mailto:psanchez@fis.upm.es)

## **EPS (Universidad Carlos III de Madrid)**

Página web: [www.ucem.es](http://www.ucem.es)  
Dirección: Departamento de Física  
Escuela Politécnica Superior  
Avda. Universidad, 30  
28911 Leganés (Madrid)  
Teléf.: (+34) 91 624 95 00  
Fax: (+34) 91 624 94 30

**E. Olías**                      **Convertidores de energía**  
Teléf.: (+34) 91 624 91 24  
(+34) 91 624 99 06  
e-mail: [olias@ing.uc3m.es](mailto:olias@ing.uc3m.es)

Esta lista no pretende ser exhaustiva, sino sólo orientadora de los temas de investigación y de la capacidad científico-tecnológica global. Se quiere evitar también cualquier tipo de interpretación o análisis comparativo sobre calidad o cantidad de producción intelectual, lo cual sería origen de posibles discrepancias. En cuanto a distribución geográfica, podemos observar que hay más densidad de centros de investigación en magnetismo en la mitad peninsular del norte de España, distinguiéndose, en primer lugar, el fuerte eje Madrid-Zaragoza-Barcelona y, luego, una ramificación a lo largo del Cantábrico, mientras que el resto de centros están algo más dispersos.

Respecto a los temas de trabajo, podemos indicar que, por número de investigadores, los temas de mayor capacidad son los relativos a:

1. Aleaciones amorfas y nanocristalinas, y sistemas particulados.
2. Investigación en fenómenos de transporte y estructura de los materiales involucrados en especial óxidos mixtos.
3. Magnetismo de películas delgadas y multicapas.

4. Tierras raras e intermetálicos.
5. Diversos tipos de temas aplicados, etc.

Esta última distribución en temas de trabajo concuerda esencialmente con las líneas de investigación en proyectos financiados dentro del Plan Nacional de Materiales (CICYT), según la cual podemos establecer varias líneas o tópicos a grandes rasgos por la financiación:

- a) Óxidos mixtos y magnetorresistencia colosal.
- c) Nanoestructuras y sistemas multifásicos.
- d) Multicapas magnéticas.
- e) Dispositivos, sensores, convertidores.
- f) Anisotropías, intermetálicos,... a los que muy recientemente se ha incorporado un apartado específico sobre nanomateriales magnéticos.

Estas grandes líneas parecen adecuarse correctamente a los temas de interés globales y a la experiencia alcanzada.

### **3.4. CENTROS TECNOLÓGICOS E INDUSTRIAS**

Entre los centros de investigación antes mencionados y las empresas podríamos distinguir una serie de centros y organismos públicos y privados cuyos objetivos persiguen una investigación aplicada. Por simplicidad, no incluimos aquí algunos laboratorios integrados en Universidades o en el CSIC, que se citan en la sección anterior. Una lista, no exhaustiva, obtenida a partir de las relaciones con otros centros que hemos podido averiguar, incluye a los siguientes centros:

## **INASMET (SAN SEBASTIÁN)**

Página web: [www.inasmet.es](http://www.inasmet.es)  
Dirección: Mikeletegi Pasealekua, 2  
Parque Tecnológico  
20009 Donostia-San Sebastián (Gipuzkoa)

**F. Peñalva**                      **Ferritas, aleaciones**  
Teléf.: (+34) 943 00 37 00  
Fax: (+34) 943 00 38 00  
e-mail: [fpenalba@inasmet.es](mailto:fpenalba@inasmet.es)

## **CIDA (Madrid)**

Dirección: Arturo Soria, 289  
28033 Madrid

**M. Golmayo**                      **Sensores magnéticos**  
Teléf.: (+34) 91 302 06 40  
Fax: (+34) 91 766 16 48

## **TPYCEA (Madrid)**

Dirección: Raimundo Fernandez Villaverde  
28003 Madrid

**V. Molina**                      **Antenas y materiales absorbentes**  
Teléf.: (+34) 91 554 80 00  
Fax: (+34) 91 533 91 85

## **CEIT (Guipúzcoa)**

Página web: [www.ceit.es](http://www.ceit.es)  
Dirección: Paseo de Manuel Lardizabal, 18  
20018 San Sebastián (Guipúzcoa)  
Teléf.: (+34) 943 21 28 00  
Fax: (+34) 943 21 30 76.

**F. J. Gracia**      **Microsensores, microelectrónica, automática**  
e-mail:              jgracia@ceit.es

### **Centro Español de Metrología (Madrid)**

Página web:        [www.cem.es](http://www.cem.es)  
Dirección:          Calle del Alfar, 2  
                         28760 Tres Cantos (Madrid)

**C. Paniagua**      **Resistividad**  
Teléf.:              (+34) 91 807 47 00  
Fax:                  (+34) 91 807 48 07  
e-mail:              cdpaniagua@mfom.es

### **Grupo Español de Sensores (GES) (Madrid)**

Página web:        [www.ifa.csic.es/ges.html](http://www.ifa.csic.es/ges.html)  
Dirección:          Serrano, 144  
                         28006 Madrid  
Teléf.:              (+34) 91 561 88 06  
Fax:                  (+34) 91 563 17 94

**F. J. Gutiérrez-Monreal - Sensores**  
e-mail:              javiergutierrez@ifa.cetef.csic.es

### **CIEMAT (Madrid)**

Página web:        [www.ciemat.es](http://www.ciemat.es)  
Dirección:          Avda. Complutense, 22  
                         28040 Madrid  
Teléf.:              (+34) 91 346 61 59  
Fax:                  (+34) 91 346 61 24

**E. Ascasibar**      **Plasma, confinamiento magnético**  
e-mail:              enrique.ascasibar@ciemat.es

## **INTA (Madrid)**

Página web: [www.inta.es](http://www.inta.es)

**R. de Juan**                      **Sensores, materiales absorbentes**  
e-mail: [dejuancr@inta.es](mailto:dejuancr@inta.es)

A continuación, se enumeran las industrias en las que se ha podido constatar que tienen o han tenido relaciones de carácter tecnológico o que, al menos, tiene departamento o sección de investigación y desarrollo. Evidentemente, de nuevo se indica que esta lista tampoco es exhaustiva.

## **Antec, S.A. (Vizcaya)**

Página web: [www.antecsa.com](http://www.antecsa.com)  
Dirección: Ramón y Cajal, 74  
48920 Portugalete (Vizcaya)  
Teléf.: (+34) 944 96 50 11  
e-mail: [info@antecsa.com](mailto:info@antecsa.com)

**R. Iturbe**                      **Imanes para aceleradores de partículas**  
e-mail: [antec.eit@telefonica.net](mailto:antec.eit@telefonica.net)

## **Sidenor I+D (Vizcaya)**

Página web: [www.sidenor.es](http://www.sidenor.es)  
Dirección: Barrio Ugarte, s/n.  
Apartado de correo 76 76  
48970 Basauri (Vizcaya)  
Teléf.: (+34) 944 87 15 00  
(+34) 943 20 67 44  
e-mail: [comunicacion@sidenor.com](mailto:comunicacion@sidenor.com)

**G. Álvarez de Toledo - Agitadores electromagnéticos**

### **IMA (Barcelona)**

Dirección: Polígono Industrial Santa Rosa  
Avda. Rafael Casanova, 114  
08100 Mollet del Vallès (Barcelona)  
Teléf.: (+34) 93 579 54 15  
Fax: (+34) 93 544 53 20

**R. Altamira**      **Imanes permanentes**  
e-mail: ricardo@ima.es

### **M. Torres (Navarra)**

Página web: [www.export.navarra.net/paghtml/todia.htm](http://www.export.navarra.net/paghtml/todia.htm)  
Dirección: Ctra. Pamplona-Huesca, km 9  
31119 Torres de Elorz (Navarra)  
Teléf.: (+34) 948 31 78 11  
(+34) 948 31 79 52

**M. Torres**      **Motores, imanes**  
e-mail: m.torres@pna.servicom.es

### **Arteche Transformadores (Vizcaya)**

Página web: [www.artech.es](http://www.artech.es)  
Dirección: Derio Bidea, 24-28  
48100 Munguía (Vizcaya)  
Teléf.: (+34) 946 74 90 22  
Fax: (+34) 946 74 09 58

**J. Loroño**      **Transformadores**  
e-mail: jcl@artech.es

### **Ames (Barcelona)**

Página web: [www.ames.es](http://www.ames.es)  
Dirección: Tort, 15  
08014 Barcelona  
Teléf.: (+34) 93 656 14 00

**J. A. Bas**                      **Aleaciones metálicas**  
e-mail: [bas@ames.es](mailto:bas@ames.es)

### **Imphy (Barcelona)**

Dirección: Fontanella, 20  
08010 Barcelona

**A. Vicente**                      **Aleaciones metálicas blandas**  
Teléf.: (+34) 93 301 09 04  
Fax: (+34) 93 301 60 91

### **Premo, S.A. (Barcelona)**

Página web: [www.premo.es](http://www.premo.es)  
Dirección: Conchita Supervia, 13  
08028 Barcelona  
Teléf.: (+34) 93 40 98 80  
e-mail: [sales@premo.es](mailto:sales@premo.es)

**J. Gazo**                              **Componentes inductivos, transforma-  
dores**

### **G. E. Power Control (Madrid)**

Página web: [www.gepowercontrols.com](http://www.gepowercontrols.com)  
Dirección: Polígono Industrial n.º 1  
Avda. Cámara de Industria, 9  
28938  
Teléf.: Móstoles (Madrid)  
(+34) 91 647 47 67

**J. Gómez**                    **Relés electromagnéticos de baja potencia**  
e-mail:                        gecib.madrid@gepc.ge.com

### **Alcatel, Asesa (Madrid)**

Página web:                www.alcatel.es  
Dirección:                 Ramírez de Prado, 5  
                                  28045 Madrid  
Teléf.:                      (+34) 91 330 40 00  
Fax:                         (+34) 91 330 50 00

**F. San Miguel**            **Electrónica de potencia**  
e-mail:                      Alcatel.Webmaster@alcatel.es

### **Fagor (Guipúzcoa)**

Página web:                www.fagorelectronica.es  
Dirección:                 Barrio San Andrés, s/n.  
                                  20500 Arraseta - Mondragón (Guipúzcoa)  
Teléf.:                      (+34) 943 71 25 26  
Fax:                         (+34) 943 71 28 93

**S. Álvarez**                **Electrodomésticos y electrónica, sensores**  
e-mail:                      salvarez@componentes.mcc.es

### **FNMT (Madrid)**

Página web:                www.fnmt.es  
Dirección:                 Jorge Juan, 106  
                                  28009 Madrid

**J. Montes**                **Tintas y bandas magnéticas**  
Teléf.:                      (+34) 91 409 63 43

### **Red Eléctrica (REE) (Madrid)**

Página web: [www.ree.es](http://www.ree.es)  
Dirección: Paseo del Conde de los Agitanes, 177  
28109 La Moraleja - Alcobendas (Madrid)  
Teléf.: (+34) 91 650 85 00  
Fax: (+34) 91 650 45 42

### **J. M. Rodríguez Grandes transformadores**

e-mail: [rodgarju@ree.es](mailto:rodgarju@ree.es)

### **RENFE (Madrid)**

Página web: [www.renfe.es](http://www.renfe.es)  
Dirección: Avda. de Pío XII, s/n.  
28036 Madrid

### **C. Román Sistemas de Seguridad**

Teléf.: (+34) 91 733 68 57  
Fax: (+34) 91 396 96 25

### **TIFSA (Madrid)**

Página web: [www.tifsa.es](http://www.tifsa.es)  
Dirección: Capitn Haya, 1-5.ª planta  
28020 Madrid  
Teléf.: (+34) 91 555 95 62  
Fax: (+34) 91 555 10 41

### **R. Loro Tecnología y sensores**

e-mail: [ineco-tifsa@ineco.es](mailto:ineco-tifsa@ineco.es)

### **Ferroxcube / Hispano Ferritas (Guadalajara)**

Página web: [www.ferroxcube.com](http://www.ferroxcube.com)

### **M. Cortés, M. San Román - Ferritas blandas**

e-mail: [miguel.cortes@ferroxcube.com](mailto:miguel.cortes@ferroxcube.com)  
[miguel.cortes@ferroxcube.com](mailto:miguel.cortes@ferroxcube.com)

### **Galvarplast (Barcelona)**

Dirección: Pintor Fortuny, 13  
08213 Polinya (Barcelona)

### **R. Sans**

### **Materiales magnéticos electrolíticos**

Teléf.: (+34) 93 713 11 44  
Fax: (+34) 93 864 92 22

### **Carburos Metálicos (Barcelona)**

Página web: [www.carburos.com](http://www.carburos.com)  
Dirección: Paseo Zona Franca, 14-20  
08038 Barcelona  
Teléf.: (+34) 93 290 00 24  
Fax: (+34) 93 290 26 75

### **J. Llibre**

### **Efecto magnetocalórico, licuefacción**

e-mail: [Llibre@carburos.com](mailto:Llibre@carburos.com)

### **Enher (Barcelona)**

J. Breda Refrigeración magnética

### **Xerox-UBX (Barcelona)**

### **R. Ziolo**

### **Materiales magnéticos mesoscópicos**

e-mail: [rziolo@compuserve.com](mailto:rziolo@compuserve.com)  
[ron@ziolo.com](mailto:ron@ziolo.com)

### **Hewlett-Packard (Barcelona)**

Página web: [www.hp.com](http://www.hp.com)  
Dirección: Avda. Diagonal, 605  
08028 Barcelona  
Teléf.: (+34) 93 401 91 00  
Fax: (+34) 93 430 84 68

### **C. Vives**

### **Microondas**

### **Nacesa (Navarra)**

Página web: [www.piher-nacesa.com](http://www.piher-nacesa.com)  
Dirección: Polígono Industrial Municipal  
Vial T2, n.º 22  
31500 Tudela (Navarra)  
Teléf.: (+34) 948 82 04 50  
Fax: (+34) 948 82 40 50

**M. Lacaba**                      **Magnetorresistencia**  
e-mail: [mlacaba@piher-nacesa.com](mailto:mlacaba@piher-nacesa.com)

### **Binder Magnete (Tarragona)**

Página web: [www.binder-es.com](http://www.binder-es.com)  
Dirección: Costa Zefir, 99  
43892 Miami-Playa (Tarragona)  
Teléf.: (+34) 977 17 27 07  
(+34) 977 81 04 29  
Fax: (+34) 977 17 01 82

**J. Kleiser**                      **Imanes**  
e-mail: [binder@binder-es.com](mailto:binder@binder-es.com)

### **Anatronic (Vacuunsmelze GmbH) (Madrid)**

Página web: [www.anatronic.com](http://www.anatronic.com)  
Dirección: Paseo Imperial, 8 - 3.ª planta  
28005 Madrid  
Teléf.: (+34) 91 366 01 59  
Fax: (+34) 91 365 50 95

### **F. Fernández-Arias - Materiales magnéticos blandos y duros**

e-mail: [fernandez@anatronic.com](mailto:fernandez@anatronic.com)

### **Tekniker (Guipúzcoa)**

Página web: [www.metallunivers.com/areas/metrologiadimensional/i+d/tekniker.htm](http://www.metallunivers.com/areas/metrologiadimensional/i+d/tekniker.htm)  
Dirección: Otaola, 20  
20600 Eibar (Gipúzcoa)  
e-mail: [tekniker@tekniker.es](mailto:tekniker@tekniker.es)

### **J. Arana Levitación magnética**

Teléf.: (+34) 943 20 67 44  
Fax: (+34) 943 20 27 57

### **Widia GmbH (Vizcaya)**

Dirección: Joaquín Arellano, 12  
48930 Getxo - Las Arenas (Vizcaya)  
Teléf.: (+34) 944 80 46 13  
Fax: (+34) 944 80 46 13

### **J. I. Bergareche Piezas magnéticas**

Teléf.: (+34) 944 64 02 93  
(+34) 91 561 88 06  
(+34) 91 411 76 51

### **Dragados Obras y Proyectos (Madrid)**

Página web: [www.dragados.com/index.htm](http://www.dragados.com/index.htm)  
Dirección: Avda. Tenerife, 4-6  
28700 San Sebastián de los Reyes (Madrid)  
Teléf.: (+34) 91 583 30 00  
Fax: (+34) 91 583 21 22  
e-mail: [info@dragados.com](mailto:info@dragados.com)

### **C. Bosch Imanes en el sector de la construcción**

e-mail: [cbc-dragados-constr@dragados.com](mailto:cbc-dragados-constr@dragados.com)

### **Clemsa (Madrid)**

Página web: [www.clemsa.es](http://www.clemsa.es)  
Dirección: Calle Xaudaró, 9  
28034 Madrid  
Teléf.: (+34) 91 358 11 10  
Fax: (+34) 91 729 33 09  
e-mail: [info@clemsa.es](mailto:info@clemsa.es)

### **P. Martín Zamorano - Piezas magnéticas**

e-mail: [pmz@clemsa.es](mailto:pmz@clemsa.es)

### **Grupo Antolín (Burgos)**

Página web: [www.grupoantolin.es](http://www.grupoantolin.es)  
Dirección: Ctra. Madrid-Irún, km 244,8  
09007 Burgos  
e-mail: [info@grupoantolin.com](mailto:info@grupoantolin.com)

### **A. Ortega Imanes y piezas**

Teléf.: (+34) 947 47 77 00  
Fax: (+34) 947 48 43 63

Al igual que en el caso de investigación fundamental, queremos aquí, sin ser exhaustivos mencionar algunas líneas de trabajo de interés entresacado de las mencionadas empresas. Estos temas son los relativos a:

1. Ferritas y materiales blandos para componentes inductivos.
2. Sensores, relés,...
3. Chapa de transformador.
4. Imanes permanentes, etc.

Es necesario aquí hacer hincapié en el carácter diverso de los intereses tecnológicos de estas empresas. Ante todo hay que recordar que sólo un número reducido de ellas poseen

capacidad real de generar nuevos productos tecnológicos, pues para la mayor parte, el interés por los productos magnéticos se reduce fundamentalmente al empleo de los mismos en alguno de sus productos acabados: de hecho los materiales y tecnología magnética es preferentemente adquirida en el extranjero. Por último, algunas de las empresas mencionadas con intereses en el área pueden ser consideradas representantes, filiales o distribuidoras de empresas matriz extranjeras.

### **3.5. IDENTIFICACIÓN DE CAPACIDADES**

Una vez identificados los diversos centros en donde se llevan a cabo labores científicas, tecnológicas, industriales y de formación con una calidad suficientemente elevada, puede ser interesante identificar los objetivos en los que resultaría razonable acentuar un impulso tecnológico.

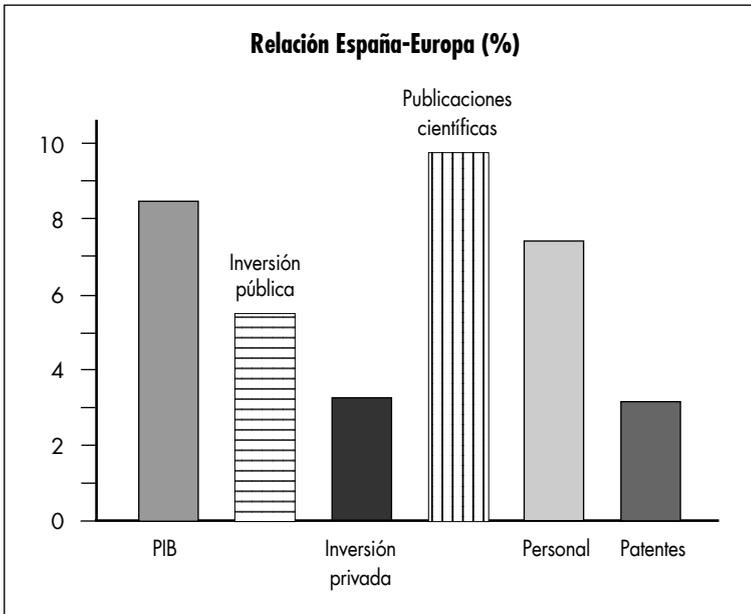
En primer lugar, podemos hacer una primera comparación entre los temas de relevancia científico-tecnológica a escala mundial y aquellos desarrollados a escala nacional. Desde un punto de vista más bien científico, podríamos quizás identificar una relativa importancia en temas sobre vidrios metálicos, aleaciones nanocristalinas y sistemas particulados y sensores. La causa de esta preponderancia relativa puede estar relacionada con una cierta tradición en estos temas de magnetismo, y posiblemente en el hecho de que originalmente, en épocas de mayor penuria económica, su investigación requería menos medios. En lo relativo a las otras áreas de investigación, podemos afirmar que se consigue representación científica de altura en casi todas las demás áreas relevantes de investigación.

Desde un punto de vista puramente tecnológico-empresarial, se observa que el interés sobre materiales magnéticos blandos, sensores magnéticos e incluso sobre imanes permanentes se aproxima relativamente a los intereses globales

a escala mundial. Sin embargo, se observa un claro retraso en todo lo relativo a tecnología de grabación magnética, que, por otra parte, es la de mayor relevancia, actualidad y perspectivas de futuro a escala mundial. Esto es aplicable, al menos parcialmente, al caso de Europa en su conjunto y puede estar relacionado con dos aspectos: en primer lugar, con la necesidad de aportar grandes inversiones no sólo en equipamiento, sino también en formación de personal tecnológico (no científico); en este sentido querríamos mencionar que esto no se consigue con la simple inversión para adquisición de materiales ultramodernos a precios extraordinariamente elevados, sino con el conocimiento generado y medios que posibiliten la venta de esta tecnología. En segundo lugar, la reducida red tecnológica española no posee aún entidad suficiente como para generar esos medios, de modo que actúa parcialmente como representante de entidades multinacionales, con la consiguiente reducción en la capacidad de tomas de decisión.

### **3.6. ALGUNOS OBJETIVOS RAZONABLES**

La inversión que se dedicó en España en el año 2000 a investigación y desarrollo fue aproximadamente el 0,94% del PIB, porcentaje que se reparte por partes casi iguales entre financiación pública (0,46%) y privada (0,54%). Este porcentaje, si bien se incrementó notablemente desde cifras muy inferiores hace no muchos años (0,3% en 1985), posteriormente ha sufrido un cierto estancamiento. Es además muy inferior al dedicado en promedio en el resto de países europeos (en torno al 1,8%). Podemos extender la comparación con el promedio europeo en otros aspectos ligados (ver la figura 17). Si comparamos las inversiones de carácter empresarial y el sector público, vemos que el gasto de I+D en el sector empresarial español representa aproximadamente un 3% del total de gasto empresarial de Europa. Por otra parte, la inversión del sector público es el 5%. Estos dos



**Figura 17**

Relación porcentual entre esfuerzos y resultados de aspectos científicos/tecnológicos/económicos entre España y Europa.

porcentajes no alcanzan el aproximadamente 8% que representa el PIB español en comparación con el europeo. Estos datos comparativos indican una mayor actividad relativa en el sector público por la investigación y desarrollo que por parte del sector empresarial. En cuanto a las publicaciones científicas en magnetismo, el porcentaje roza el 9% de las europeas, lo cual puede considerarse como aceptable. Respecto al porcentaje de personal empleado en puestos de carácter científico-técnológico es próximo al 7%, no muy inferior al 8% del caso del PIB. Por su parte, el porcentaje de patentes no supera el 3%, que es claramente desfavorable frente a otros índices.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, podríamos sugerir como objetivo general, en primer lugar, la utilización de las capa-

ciudades investigadoras-tecnológicas en las que se posee una probada capacidad y autonomía, potenciándolas si cabe para obtener el mayor rendimiento tecnológico-industrial a corto plazo. En este sentido, quizás fuese de interés la actividad empresarial española en áreas como la de sensores magnéticos –con gran aplicación, por ejemplo, en el sector del automóvil– u otras que en principio pudieran parecer marginales, pero con elevado valor añadido. Por lo demás, no parece adecuado tratar de competir en la producción de gran tonelaje de materiales magnéticos, como chapa de transformador o imanes permanentes, dado que el mercado mundial está cubierto por fabricantes concentrado en un pequeño número de multinacionales. Por otra parte, la actividad en España relativa a la grabación magnética es bastante reducida, y además, se espera que existan notables modificaciones a corto plazo con la inclusión en el mercado de productos como DVD y memorias MP3. El mercado de almacenamiento de datos está, asimismo, monopolizado por grandes empresas multinacionales con las que no tiene sentido competir.

En segundo lugar, parece necesario incrementar en lo posible la ayuda hacia las tecnologías punta de alto valor adquisitivo con un objetivo más a medio-largo plazo. En este sentido, parece de interés la colaboración y el desarrollo de proyectos tecnológicos conjuntamente con centros de investigación y empresas de mayor capacidad tecnológica con el objetivo de poder incorporar en un futuro esas tecnologías o bien las que en su momento sean de mayor interés. Para ello, parece importante la integración tanto de centros de investigación como de los departamentos de I+D+i de empresas en proyectos financiados por las Unión Europea. Un aspecto particular es además el de la propiedad intelectual de los descubrimientos e innovaciones. Las grandes empresas multinacionales suelen tener la estrategia de proteger dicha propiedad mediante la posesión de un número elevado de patentes en torno a un desarrollo particular relacionado con sus productos. Esta política parece menos apro-

piada para empresas de menor envergadura, por los costes de mantenimiento de esas patentes y, también, debido a que en ocasiones puede no ser conveniente dar a conocer explícitamente a la competencia el producto de mayor interés. Como hemos mencionado antes, el porcentaje de patentes realizado por empresas y centros españoles es reducido en comparación con los europeos. En el caso de las patentes desarrolladas por investigadores no ligados al sector privado, la protección de la propiedad intelectual requiere una atención especial y quizás una ayuda especial por parte de los organismos públicos.

Para llevar a cabo esos objetivos, se indican a continuación algunos aspectos que hay que tener en cuenta. En particular, y atendiendo a los aspectos considerados en una sección previa, el procesado industrial de materiales en tres etapas: la obtención de la materia prima, el procesado del material y su maquinado.

Desde el punto de vista técnico, es necesario considerar la investigación tecnológica como parte del proceso industrial y generador de know-how: cómo sustituir o innovar materiales obsoletos, una alternativa a la simple adquisición de materiales de origen externo comparativo con productos previos.

#### *Pasos en la actuación:*

1. Potenciación de sectores a partir de la experiencia competitiva industrial o semi-industrial previa adquirida.
2. Incremento, incorporación o derivación de personal formado con experiencia tecnológica hacia puestos con capacidad de toma de decisión.
3. Cómo perder la desconfianza de lo próximo: considerar beneficios a medio plazo y perjuicios económicos a corto plazo.

Por otra parte, se debe concienciar claramente al sector investigador de que el objetivo de la empresa es la rentabili-

dad económica, al cual se debe llegar en un periodo de tiempo lo más corto posible; y al sector empresarial, de que debe, por su propio beneficio, potenciar al máximo sus departamentos de I+D, creación de laboratorios homologados, etcétera.

Otros aspectos que podrían facilitar la conjunción de actividades de investigación con la empresa privada son:

- a) Incluir cierta formación de carácter empresarial durante el periodo de formación académica.
- b) Creación de guías de capacidades e interés por parte respectivamente de centros de investigación y empresas.

Estos aspectos pueden ser interesantemente analizados y discutidos por grupos mixtos de trabajo formados por investigadores y empresarios. En este sentido, habría que mencionar, al menos, la iniciativa recientemente propuesta y que ya dio lugar a dos reuniones nacionales en Madrid y Bilbao, o la relativa a la reciente fundación del Club Español de Magnetismo como una Asociación destinada a promover todo tipo de actividad en magnetismo y materiales magnéticos, así como incentivar las relaciones entre centros tecnológicos, empresas y centros de investigación.

Con objeto de potenciar la investigación tecnológica y, al mismo tiempo, fomentar las relaciones entre centros de investigación y empresas, es preciso mencionar la actividad desarrollada por diversos centros tecnológicos y similares de más o menos reciente creación. En este sentido, la Comunidad Autónoma del País Vasco es donde posiblemente se ha alcanzado una mayor actividad, siendo un buen ejemplo centros como Inasmet o CEIT. Se debe mencionar también el laboratorio mixto Universidad Central de Barcelona y Rank Xerox, o la importante actividad tecnológica en torno a campus universitarios, como los de las Universidades Autónomas de Barcelona o Madrid; aunque quizás el ejemplo más notable es el del Instituto de Magnetismo Aplicado "Salvador Velayos", de la Universidad Complutense de

Madrid y RENFE. Este centro, surgido por iniciativa investigadora, ha consolidado exitosamente su actividad tecnológica en diversas ramas de aplicación en magnetismo.

### **3.7. ALGUNAS PERSPECTIVAS GLOBALES**

Por último, se indican brevemente algunos puntos para mejorar las perspectivas del futuro tecnológico "magnético":

1. Promover e incentivar la generación de departamentos de I+D+i en empresas para generar tecnología propia autónoma facilitadas por ayudas parciales de organismos públicos como administraciones públicas, comunidades autónomas, europeas, etc.
2. Necesidad de formación de personal con elevada cualificación tecnológica y su incorporación a la empresa en puestos de responsabilidad tecnológica, como forma de reforzar la actividad innovadora de la misma y eliminar barreras conceptuales y de desconfianza con centros de investigación aplicada y fundamental.

Estos puntos son considerados dentro de las recomendaciones (ver la publicación *Relaciones de la empresa con el sistema público de I+D*, de Cotec, 1999) más generales para el sistema público de I+D: cuestionar las misiones de los centros, adecuar la gestión a la misión tecnológica, movilidad de investigadores, agilizar modelos particulares para la colaboración como institutos universitarios o similares. En cambio, para el sector empresarial esas recomendaciones se concretan en necesidad de umbrales mínimos de capacidad tecnológica, papel de las asociaciones empresariales y grandes empresas, y atención a la capacidad científica pública para detectar oportunidades de negocio. Todo ello dentro de un objetivo de obtener un máximo rendimiento de las capacidades intelectual aportada por la investigación y económica aportada por la empresa.

De los contactos entre investigación y empresa se ha concluido que, desde el punto de vista empresarial, se han obtenido algunos resultados tecnológicos interesantes, pero la mayor parte de las veces sólo potenciales o reducidos, de poca incidencia en términos palpables de rentabilidad, cuota de mercado, etc. Mientras que, desde el punto de vista científico, esos contratos permiten un mayor número de investigadores contratados que generan un mayor rendimiento tanto tecnológico como además puramente científico; sin embargo, deben vencer ciertas barreras de desconfianza inicial y un sentido de "rebajarse" para desarrollar tareas más "terrenas".

De acuerdo con estadísticas recientes, se puede considerar que el grado de innovación tecnológica que posee el país está resurgiendo de una situación ciertamente negativa respecto del resto de países de Europa de hace unos veinte años. Esto se debe a un grado de desarrollo global de la sociedad española. En los últimos quince años en particular, se observa un avance del esfuerzo tecnológico continuado en todos sus sentidos (ver el Informe Cotec 2002), tanto en su aspecto económico como de personal tecnológico, así como de resultados científicos (publicaciones, patentes) y tecnológicos (resultados de exportación). No cabe duda de que esto es un reflejo del continuo incremento de la cantidad invertida en tecnología (I+D) desde un 0,3% en 1983 hasta el 0,94% de 2000, si bien con ciertas fluctuaciones. Tal como ponen de manifiesto recientes estudios de estrategia tecnológico-industrial debería añadirse la "i" de innovación al actual término de investigación y desarrollo (I+D) para hacer plenamente competitiva la actuación tecnológica. De acuerdo con algunas conclusiones de estos informes, en la cadena de innovación tecnológica formada por las administraciones públicas, la infraestructura de soporte a la innovación, el sistema público de I+D, las empresas y el entorno, son las empresas la parte más débil de la cadena. En España se ha producido un gran esfuerzo innovador por

parte de las empresas. Según recogen las estadísticas oficiales publicadas por el INE, la proporción de empresas innovadoras ha aumentado notablemente, pues ha pasado de un 10% en 1998 a un 19,7% en 2000, si bien hay que tener en cuenta que la última estadística ha cambiado la base de registro, incorporando las empresas de servicios lo cual, por otra parte, es muy positivo debido a la importancia de este sector en nuestro país.

En este sentido se espera que el nuevo Plan Nacional de I+D+I haga posible de manera más efectiva la transferencia de tecnología y que también sean considerados los aspectos "magnéticos" que se tratan en este informe.

## **DOCUMENTOS COTEC SOBRE OPORTUNIDADES TECNOLÓGICAS**

### **Documentos editados**

- N.º 1: Sensores.
- N.º 2: Servicios de información técnica.
- N.º 3: Simulación.
- N.º 4: Propiedad industrial.
- N.º 5: Soluciones microelectrónicas (ASICs) para todos los sectores industriales.
- N.º 6: Tuberías de polietileno para conducción de agua potable.
- N.º 7: Actividades turísticas.
- N.º 8: Las PYMES y las telecomunicaciones.
- N.º 9: Química verde.
- N.º 10: Biotecnología.
- N.º 11: Informática en la Pequeña y Mediana Empresa.
- N.º 12: La telemática en el sector de transporte.
- N.º 13: Redes neuronales.
- N.º 14: Vigilancia tecnológica.
- N.º 15: Materiales innovadores. Superconductores y materiales de recubrimiento.
- N.º 16: Productos alimentarios intermedios (PAI).
- N.º 17: Aspectos jurídicos de la gestión de la innovación.
- N.º 18: Comercio y negocios en la sociedad de la información.
- N.º 19: Materiales magnéticos.

## **DOCUMENTOS COTEC SOBRE NECESIDADES TECNOLÓGICAS**

### **Documentos editados**

- N.º 1: Sector lácteo.
- N.º 2: Rocas ornamentales.
- N.º 3: Materiales de automoción.
- N.º 4: Subsector agroindustrial de origen vegetal.
- N.º 5: Industria frigorífica y medio ambiente.
- N.º 6: Nuevos productos cárnicos con bajo contenido en grasa.
- N.º 7: Productos pesqueros reestructurados.
- N.º 8: Sector de la construcción.
- N.º 9: Sector de la rehabilitación.
- N.º 10: Aguas residuales.
- N.º 11: Acuicultura.
- N.º 12: Reducción de emisiones atmosféricas industriales.
- N.º 13: El mantenimiento como gestión de valor para la empresa.
- N.º 14: Productos lácteos

COTEC es una fundación de origen empresarial que tiene como misión contribuir al desarrollo del país mediante el fomento de la innovación tecnológica en la empresa y en la sociedad españolas.

**Cotec** ■

Fundación Cotec  
para la Innovación Tecnológica  
Pza. Marqués de Salamanca 11, 2º izda.  
28006 Madrid  
Telf. (34) 91 436 47 74  
Fax. (34) 91 431 12 39  
<http://www.cotec.es>

ADE (CASTILLA Y LEÓN)  
ADER (LARIOJA)  
AGENCIAEFE  
ALCATEL  
ALSTOM ESPAÑA  
ASTRIUM-CRISA  
AYUNTAMIENTO DE GIJÓN  
AYUNTAMIENTO DE VALENCIA  
BILBAO BIZKAIAKUTXA  
CAJADE AHORROS Y MONTE DE PIEDAD DE MADRID  
CÁMARADE COMERCIO E INDUSTRIA DE MADRID  
CETENASA(NAVARRA)  
COMPAÑIA VALENCIANA DE CEMENTOS PORTLAND  
CONSEJERÍA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA (CASTILLA-LAMANCHA)  
CONSEJERÍA DE EDUCACIÓN Y CIENCIA (JUNTA DE ANDALUCÍA)  
DELOITTE&TOUCHE  
D.G. INVESTIGACIÓN C.A. MADRID  
ELIOP  
ENDESA  
ENRESA  
ERICSSON  
FREIXENET  
FUNDACIÓ CATALANA PER A LARECERCA  
FUNDACIÓN VODAFONE  
FUNDACIÓN AUNA  
FUNDACIÓN BANCO BILBAO-VIZCAYA  
ARGENTARIA  
FUNDACIÓN BARRIÉ DE LAMAZA  
FUNDACIÓN CAMPOLLANO  
FUNDACIÓN FOCUS-ABENGOA  
FUNDACIÓN IBIT  
FUNDACIÓN LILLY  
FUNDACIÓN RAMÓN ARECES  
FUNDACIÓN UNIVERSIDAD-EMPRESA  
FUNDECYT(EXTREMADURA)  
GLAXOSMITHKLINE  
GRUPO ANTOLÍN IRAUSA  
GRUPO DRAGADOS  
GRUPO DURO FELGUERA  
GRUPO LECHE PASCUAL  
GRUPO PRISA  
GRUPO SPRI  
HIDROELÉCTRICA DEL CANTÁBRICO  
HISPASAT  
IBERDROLA  
IBERIA  
IBM  
IMADE  
IMPIVA  
INDRA  
INSTITUTO DE DESARROLLO ECONÓMICO DEL PRINCIPADO DE ASTURIAS  
INSTITUTO DE FOMENTO DE LA REGIÓN DE MURCIA  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ARAGÓN  
MERCAPITAL  
NECSO  
OHL  
O-KYAKU  
PATENTES TALGO  
REPSOLYPF  
SANTANDER CENTRALHISPANO  
SECRETARÍA XERAL DE INVESTIGACIÓN E DESENVOLVIMENTO (GALICIA)  
SEPES  
SIEBELSYSTEMS ESPAÑA  
SOCINTEC  
SODERCAN (CANTABRIA)  
SOFESA (CANARIAS)  
TECNALIA  
TÉCNICAS REUNIDAS  
TELEFÓNICA  
UNIÓN FENOSA  
ZELTIA