

vt

informe de vigilancia tecnológica

mi+d

vt
11

aplicaciones actuales y futuras de los nanotubos de carbono

María Jesús Rivas Martínez

José Román Ganzer

María Luisa Cosme Huertas

www.madrimasd.org

cimtan
mi+d

CEIM
CONFEDERACIÓN EMPRESARIAL
DE MADRID - CEOE

EM
La Suma de Todos
Comunidad de Madrid
www.madrid.org

vt

informe de vigilancia tecnológica

miod

aplicaciones actuales y futuras de los nanotubos de carbono

María Jesús Rivas Martínez

José Román Ganzer

María Luisa Cosme Huertas

www.madrimasd.org

cimtan
miod

CEIM
CONFEDERACIÓN EMPRESARIAL
DE MADRID - CEDE

EM
La Suma de Todos
Comunidad de Madrid
www.madrid.org

Colección de Informes de Vigilancia Tecnológica madri+d

Dirigida por:

José de la Sota Rius

Coordinada por:

Fundación madri+d para el Conocimiento
CEIM Confederación Empresarial de Madrid - CEOE

cimtan
mi+d



El Círculo de Innovación en Materiales, Tecnología Aeroespacial y Nanotecnología (CIMTAN) se enmarca dentro del IV Plan Regional de Investigación Científica e Innovación Tecnológica (IV PRICIT). El CIMTAN es una iniciativa de la Dirección General de Universidades e Investigación de la Comunidad de Madrid en la que participan el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) y la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M).

El presente informe de Vigilancia Tecnológica ha sido elaborado en el INTA, institución a la que pertenecen los miembros del CIMTAN expertos en tecnología aeroespacial y nanotecnología.

Los autores agradecen la colaboración ofrecida durante la elaboración del presente informe y su revisión final a:

- Dr. Ángel Maroto Valiente. Investigador Juan de la Cierva. Departamento de Química Inorgánica y Química Técnica. Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED).
- Dr. Julio A. Alonso. Catedrático de Universidad. Departamento de Física Teórica, Atómica y Óptica. Universidad de Valladolid.

Todos los derechos están reservados. Se autoriza la reproducción total o parcial de este informe con fines educativos, divulgativos y no comerciales citando la fuente. La reproducción para otros fines está expresamente prohibida sin el permiso de los propietarios del copyright.

Título: Informe de Vigilancia Tecnológica madri+d "Aplicaciones actuales y futuras de los nanotubos de carbono"

Autores: María Jesús Rivas Martínez, José Román Ganzer y María Luisa Cosme Huertas del Círculo de Innovación en Materiales, Tecnología Aeroespacial y Nanotecnología

© De los textos: Los autores

© De la colección «vt» y de la presente edición:
CEIM Confederación Empresarial de Madrid - CEOE
Dirección General de Universidades e Investigación
Fundación madri+d para el Conocimiento

Edita: Fundación madri+d para el Conocimiento
Velázquez, 76. E-28001 Madrid

Depósito Legal: M-56.489-2007

ISBN-13: 978-84-612-1528-7

Proyecto Gráfico: base12 diseño y comunicación s.l.

Ilustraciones: Los autores

4	ORGANIZACIÓN DEL INFORME
5	RESUMEN EJECUTIVO
9	EXECUTIVE SUMMARY
11	CAPÍTULO 1 Presentación
	1.1 Introducción (PÁG. 13)
	1.2 Objeto de estudio (PÁG. 14)
	1.3 Justificación (PÁG. 15)
	1.4 Metodología de trabajo (PÁG. 16)
19	CAPÍTULO 2 Aplicaciones de los nanotubos de carbono
	2.1 Electrónica (PÁG. 21)
	2.2 Sensores (PÁG. 40)
	2.3 Instrumentación científica (PÁG. 44)
	2.4 Fotónica (PÁG. 48)
	2.5 Materiales (PÁG. 50)
	2.6 Biotecnología y Química (PÁG. 56)
	2.7 Energía (PÁG. 60)
	2.8 Mecánica (PÁG. 66)
73	CAPÍTULO 3 Análisis de información
	3.1 Análisis de referencias científicas (PÁG. 75)
	3.2 Análisis de proyectos (PÁG. 107)
	3.3 Análisis de patentes (PÁG. 138)
163	CAPÍTULO 4 Datos de mercado
	4.1 Análisis de mercado (PÁG. 165)
	4.2 Agentes públicos y privados involucrados en el desarrollo de aplicaciones de nanotubos (PÁG. 170)
171	CAPÍTULO 5 Resumen y conclusiones

Organización del informe

Este informe se entrega en dos formatos: papel y CD (éste último incluido en la contraportada del primero). La estructura de la información contenida en el CD es la siguiente:

- **Informe:**
Es el informe propiamente dicho que se entrega, además, en formato papel.
- **Anexo I Bases de datos y estrategias de búsqueda:**
Listado de bases de datos y palabras clave utilizadas.
- **Anexo II Artículos, referencias científicas:**
Listado de artículos utilizados para la elaboración del informe.
- **Anexo III Proyectos de investigación:**
Listado de proyectos utilizados para la elaboración del informe.
- **Anexo IV Patentes:**
Listado de patentes utilizadas para la elaboración del informe.
- **Anexo V Empresas y centros de investigación:**
Listado de empresas y centros de investigación involucrados en referencias científicas, proyectos y patentes.
- **Anexo VI Empresas y centros de investigación españoles:**
Listado de empresas y centros de investigación consumidores de nanotubos de carbono en España.

El fichero "Informe" es el que se entrega, además, en formato papel. Para usar el formato CD es suficiente con editar este fichero, ya que permite acceder al resto de la información mediante hipervínculos.

Resumen ejecutivo

El informe de Vigilancia Tecnológica “Aplicaciones actuales y futuras de los nanotubos de carbono” ha sido realizado por el Círculo de Innovación en Materiales, Tecnología Aeroespacial y Nanotecnología (CIMTAN) y se considera de interés general para toda la comunidad científica y empresarial que trabaja en el área de nanotecnología. Para su elaboración el personal del CIMTAN ha recibido asesoramiento y colaboración de expertos de la UNED y de la Universidad de Valladolid.

El objetivo del informe es mostrar distintas aplicaciones posibles para los nanotubos de carbono, tanto las que ya se comercializan como aquellas que sólo existen a nivel de prototipo o de investigación científica, así como detectar empresas y centros de investigación involucrados en su desarrollo a nivel mundial.

Los nanotubos de carbono, similares a pequeñas láminas de grafito enrolladas con diámetros nanométricos y longitudes del orden de las micras, son materiales únicos con propiedades mecánicas, eléctricas, ópticas, térmicas y químicas excepcionales que los hacen aptos para mejorar numerosos productos ya existentes e incluso para generar otros nuevos.

Muchas son las aplicaciones que pueden obtener importantes beneficios al incorporar nanotubos de carbono. Los materiales compuestos reforzados con nanotubos, las pantallas planas que utilizan los nanotubos como emisores de campo, los sensores biológicos y químicos para detectar sustancias contaminantes, la administración de fármacos o las pilas de combustible son sólo algunas de ellas. En general, sectores como electrónica, materiales, sensores, biotecnología, química, energía, mecánica, instrumentación científica y fotónica podrían verse favorecidos por la introducción de nanotubos de carbono en muchos de sus productos.

La evolución de las publicaciones que tratan sobre aplicaciones de nanotubos de carbono presenta una tendencia ascendente en los últimos años, lo cual es una muestra del gran interés que suscitan. EE.UU. es el líder mundial en cuanto a número de publicaciones, pero también Asia es una región importante, debido en parte a la presencia en ella de importantes empresas electrónicas que pueden obtener grandes beneficios al incorporar nanotubos de carbono en sus productos. No hay que olvidarse tampoco de Europa, que también apuesta por estas nuevas tecnologías.

El mercado de las aplicaciones de los nanotubos de carbono es todavía muy incipiente. Sólo los materiales compuestos reforzados con nanotubos aparecen en accesorios deportivos como raquetas de tenis o bicicletas. Las aplicaciones electrónicas son muy prometedoras ya que en ellas los nanotubos de carbono permitirán continuar con la miniaturización progresiva que afecta a esta área y que se encuentra amenazada por los límites físicos de funcionamiento del silicio, a punto de ser alcanzados. Sin embargo sólo hay prototipos electrónicos que incorporan

nanotubos de carbono, todavía no hay productos comerciales debido a la falta de procesos industriales adecuados para su elaboración. Las tecnologías restantes que incorporan nanotubos de carbono muestran distintos grados de madurez para su acceso al mercado, pero ninguna se comercializa aún.

Los nanotubos de carbono se presentan como una interesante alternativa para los fabricantes de multitud de productos que pretendan innovar, ya que prometen conseguir prestaciones inimaginables hasta ahora y revolucionar el mercado cuando irrumpen en él.

Executive summary

The Technology Watch report “Present and future applications of carbon nanotubes” has been made by the Circle of Innovation in Materials, Aerospace Technology and Nanotechnology (CIMTAN) and it is considered of general interest for scientists and companies involved in the area of nanotechnology. For its elaboration the CIMTAN has received advice and collaboration from experts in the UNED and the University of Valladolid.

The objective of the report is to show different possible applications for carbon nanotubes, both already commercialized ones and those which only exist at prototype or scientific research level, as well as to detect companies and research centres involved in their development at world-wide level.

Carbon nanotubes, similar to small graphite coiled sheets with nanometric diameters and lengths about microns, constitute a unique material with exceptional mechanical, electrical, optical, thermal and chemical properties which make them suitable to improve numerous already existing products and to even generate other new ones.

Many are the applications that can take advantage of the properties of carbon nanotubes. Composite materials reinforced with nanotubes, flat screens that use the nanotubes as field emitters, biological and chemical sensors used to detect polluting substances, drug administration or fuel cells are only some of them. In general, sectors like electronics, materials, sensors, biotechnology, chemistry, energy, mechanics, scientific instrumentation and photonics could get many advantages from the introduction of carbon nanotubes in many of their products.

The yearly ascending tendency in the number of publications that treat of carbon nanotube applications shows the great interest existing about them. EE.UU. is the world-wide leader in number of publications, but Asia is also an important region, partly due to the presence in it of very important electronic companies which can obtain great benefits when incorporating carbon nanotubes to their products. Although Europe appears in third place in number of publications, its contribution to the research and development of carbon nanotube applications is also very important, clearly betting on these new technologies.

The market of carbon nanotube applications is still very incipient. Only composite materials reinforced with nanotubes appear in sport accessories like tennis rackets or bicycles. Electronic applications are very promising since carbon nanotubes will allow them to continue with the progressive miniaturization typical of this area which is at present threatened by the physical limits of operation of silicon, near to be reached. Nevertheless there are only electronic prototypes that incorporate carbon nanotubes, there are no commercial products due to the lack of suitable industrial processes for their elaboration. The other technologies that incorporate carbon nanotubes show different degrees of maturity in their access to the market, but they are not commercialized yet.

Carbon nanotubes appear like an interesting alternative for the manufacturers of multiple products who are interested in innovating, since they promise to produce incredible benefits and to revolutionize the market when they burst into it.

CAPÍTULO 1

Presentación

- 1.1 Introducción (PÁG. 13)
- 1.2 Objeto de estudio (PÁG. 14)
- 1.3 Justificación (PÁG. 15)
- 1.4 Metodología de trabajo (PÁG. 16)

Este informe de Vigilancia Tecnológica ha sido realizado por el Círculo de Innovación en Materiales, Tecnología Aeroespacial y Nanotecnología (CIMTAN) en el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA).

Se expone en esta sección una breve introducción a los nanotubos de carbono, el objetivo de la realización de este informe, las razones que lo han motivado y la metodología de trabajo seguida por el CIMTAN durante su elaboración.

1.1 Introducción

Los nanotubos de carbono de pared simple (**SWCNT** – Single Wall Carbon Nanotubes) están constituidos por **átomos de carbono dispuestos en una red hexagonal cilíndrica**, de forma que su estructura es la misma que se obtendría si se enrollara sobre sí misma una lámina de grafito. Sus extremos pueden estar cerrados por media esfera de fullereno o pueden estar abiertos. Los nanotubos de carbono de pared múltiple (**MWCNT** – Multiwall Carbon Nanotubes) tienen una estructura similar a varios SWCNT concéntricos con diferentes diámetros. En ambos casos su principal característica, que dará lugar a un buen número de propiedades excepcionales, es que muestran una **relación longitud/diámetro** muy elevada: su diámetro es del orden de los nanómetros y su longitud puede variar desde unas micras hasta milímetros e incluso algunos centímetros.

Los MWCNT fueron descubiertos en 1991 por **Sumio Iijima**, un ingeniero japonés de la empresa NEC. Desde el principio mostraron importantes efectos cuánticos debidos a su estructura casi unidimensional, lo que incentivó a numerosos científicos a trabajar en ellos. Los SWCNT se descubrieron dos años después por el grupo de Iijima en NEC y por otro grupo en el IBM Almaden Laboratory.

A partir de su descubrimiento los científicos buscaron la forma de producirlos en el laboratorio. Desde entonces se ha avanzado mucho en los distintos métodos de **síntesis** que han ido surgiendo, así como en los de **caracterización, purificación y separación**.

Desde el principio la teoría predijo excepcionales **propiedades** para los nanotubos de carbono, que han podido ser comprobadas experimentalmente a medida que ha evolucionado la instrumentación científica. Las propiedades son diferentes en los **SWCNT** y los **MWCNT**. Dependen, además, fuertemente de sus **dimensiones** (diámetro y longitud) y de los **defectos** presentes en el nanotubo (vacantes o impurezas ocupando el lugar de un átomo de carbono, deformaciones, inclinaciones,). Pero también dependen de la forma en que están dispuestos los hexágonos de la lámina de grafito, es decir de cómo se enrollaría la hipotética lámina de grafito que daría lugar a nuestro nanotubo. Los **índices de Hamada** (n,m) cuantifican esta cualidad de los nanotubos de carbono, dando lugar a tres grandes grupos: nanotubos armchair ($n=m$), nanotubos zigzag ($m=0$) y nanotubos chiral ($n \neq m \neq 0$).

Las excepcionales **propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas, químicas y ópticas** de los nanotubos de carbono les capacitan para ser utilizados en multitud de **aplicaciones**, a cuya detección y análisis se dedica este informe. En el desarrollo de cada aplicación se explicarán la propiedad o propiedades de los nanotubos de carbono que la hacen posible.

1.2 Objeto de estudio

Dos son los objetivos fundamentales de este informe de Vigilancia Tecnológica.

En primer lugar, detectar **aplicaciones** actuales y futuras de los nanotubos de carbono y, por tanto, presentar un estado del arte sobre el tema.

En segundo lugar, conocer cuáles son los **agentes** involucrados a nivel mundial en el desarrollo de las mismas.

1.3 Justificación

Desde que se conoció la existencia de los nanotubos de carbono se han ido descubriendo sus interesantes propiedades y éstas han abierto un mundo de posibles aplicaciones en las que continuamente se consiguen importantes progresos. Existe actualmente un enorme interés sobre este tema en la comunidad científica que trabaja en el área de nanotecnología. Numerosas empresas también observan con atención los avances científicos que se producen por las ventajas competitivas y económicas que supondría la incorporación de nanotubos de carbono en el desarrollo de sus productos.

Este informe es, por tanto, de utilidad para multitud de empresas y grupos de investigación que forman parte del **Sistema Regional de I+D+i de la Comunidad de Madrid**.

Investigadores que quieran empezar una nueva línea de investigación pueden encontrar aquí una aproximación inicial y un contexto general en el que situarse e incluso empresas con las que colaborar.

Empresas productoras de nanotubos de carbono obtienen información de qué sectores pueden ser sus clientes e incluso nombres concretos de compradores potenciales para sus productos, con los que pueden asociarse para proporcionarles los nanotubos de carbono adecuados con las propiedades específicas que necesitan.

También las **empresas fabricantes de aplicaciones** en las que pueden incorporarse nanotubos de carbono podrían beneficiarse de los datos aquí suministrados, ya que en el informe se explican las ventajas que pueden aportar los nanotubos de carbono a sus productos, además de información sobre posibles competidores y colaboradores.

1.4 Metodología de trabajo

La elaboración de este informe comenzó con un profundo **estudio** del tema a tratar. A continuación se realizaron búsquedas específicas en **bases de datos** especializadas con sentencias de búsqueda adecuadas al objetivo a conseguir (ver Anexo I Bases de datos y estrategias de búsqueda). Se buscaron publicaciones, proyectos y patentes. Los resultados que se obtuvieron fueron **filtrados, analizados** en profundidad y **clasificados** convenientemente. El último paso fue plasmar los resultados en el presente documento.

Durante la elaboración del informe se contó en todo momento con el apoyo de **expertos** en el tema, siendo ellos los encargados de revisar y validar la información que aquí se presenta.

Para que el aprovechamiento de la información contenida en este informe sea óptimo, se han considerado varias secciones. En la CAPÍTULO 1, en la que nos encontramos, se hace una breve introducción del contenido; en la CAPÍTULO 2 se explican las áreas y productos concretos en los que se pueden utilizar nanotubos de carbono; en la CAPÍTULO 3 se analizan los resultados obtenidos en las búsquedas realizadas, lo cual aporta valiosa información sobre países, autores, empresas, evolución anual de resultados, etc., todo ello considerando por separado publicaciones, proyectos y patentes; en la CAPÍTULO 4 se incluyen datos de mercado y se explica qué aplicaciones están ya comercializadas y cuáles en período de desarrollo de prototipos o simplemente en fase de investigación. El informe se completa con el resumen y las conclusiones expuestas en la CAPÍTULO 5.

Uno de los objetivos del CIMTAN es la difusión de las técnicas de Vigilancia Tecnológica (VT) entre las empresas, asociaciones de empresas, centros de investigación, etc. que estén o quieran estar involucradas en los sectores de Materiales, Tecnología Aeroespacial y Nanotecnología. Por este motivo, en los informes de VT que se realizan a petición de los clientes, no sólo se recoge información de interés para la empresa, asociación o centro de investigación, sino que también se detallan las fuentes de información utilizadas y las estrategias de búsqueda empleadas, de forma que quien esté interesado en actualizar la información disponga de las herramientas necesarias para hacerlo.

En la elaboración de los informes se intenta que el resultado sea de fácil lectura y rápida consulta. Para ello se exponen los análisis de forma visual mediante gráficos y tablas.

FIGURA: El proceso de la Vigilancia Tecnológica.



Ilustración interna del CIMTAN que refleja el proceso de la Vigilancia Tecnológica.

CAPÍTULO 2

Aplicaciones de los nanotubos de carbono

- 2.1 Electrónica (PÁG. 21)
- 2.2 Sensores (PÁG. 40)
- 2.3 Instrumentación científica (PÁG. 44)
- 2.4 Fotónica (PÁG. 48)
- 2.5 Materiales (PÁG. 50)
- 2.6 Biotecnología y Química (PÁG. 56)
- 2.7 Energía (PÁG. 60)
- 2.8 Mecánica (PÁG. 66)

Se desarrollan en esta sección las diversas aplicaciones de los nanotubos de carbono que se han detectado durante la realización de este informe. Se han agrupado en los siguientes grandes temas: **electrónica, sensores, instrumentación científica, fotónica, materiales, biotecnología y química, energía y mecánica**. En los siguientes apartados se desarrolla cada uno de ellos.

2.1 Electrónica

A pesar de las extraordinarias propiedades mecánicas y térmicas de los nanotubos de carbono, de las que tanto se habla en la literatura, sus primeras aplicaciones prácticas han sido electrónicas, planteándose como una posible revolución en determinadas áreas como la informática.

Las peculiares **propiedades eléctricas** de los nanotubos de carbono son las que han permitido utilizarlos en aplicaciones electrónicas. Puede verse a continuación una tabla resumen en la que se exponen las principales aplicaciones que surgen de cada propiedad.

<i>Propiedad</i>	<i>Aplicación</i>
Metálicos ($n-m=3i$).	Nanocircuitos: Interconectores.
Semiconductores ($n-m \neq 3i$).	Nanocircuitos: Diodos, Transistores.
Emisión de campo.	Pantallas planas, lámparas y tubos luminiscentes, tubos de rayos catódicos, litografía por haz de electrones, fuentes de rayos X, amplificadores de microondas, tubos de descarga en redes de telecomunicaciones, microscopios electrónicos de barrido, nanotriodos, betatrones.
Resuenan mecánicamente ante una señal electromagnética incidente (por fuerzas de Coulomb).	Filtros RF.
Comportamiento resistivo, capacitivo e inductivo.	Filtros RF.
Se deforman en presencia de un campo eléctrico por fuerzas electrostáticas.	Memorias.
Transforman la luz en electricidad y producen luz al inyectarles exceso de carga.	Dispositivos optoelectrónicos.

Tal vez la propiedad eléctrica más importante de los nanotubos de carbono que determina su utilización en electrónica es que pueden ser **metálicos** o **semiconductores**. Para que un nanotubo sea metálico debe de cumplirse que la diferencia $n-m$ (n y m son los índices de Hamada, parámetros que indican la forma en que se enrollaría la lámina de grafito que daría lugar al nanotubo) debe ser múltiplo de 3, en caso contrario será semiconductor.

No todos los nanotubos semiconductores tienen el mismo gap. Debido a que en el mundo cuántico los electrones se comportan como partículas y como ondas, estas pueden cancelarse o reforzarse. El hecho de que los nanotubos de carbono sean similares a láminas de grafito enrolladas, hace que algunas de las ondas que corresponderían al grafito sin enrollar se cancelen cuando éste se enrolla, quedando sólo unos estados cuánticos (o longitudes de onda) permitidos para los electrones. Cuanto más pequeño es el diámetro del nanotubo habrá menos estados permitidos que

estarán muy separados energéticamente, aumentando el número de estados y disminuyendo su separación a medida que crece el diámetro. De esta manera las dimensiones de los nanotubos determinan el tamaño de su gap. Es muy importante, por tanto, controlar dichas dimensiones, para lo cual es fundamental el método de crecimiento empleado. Incluso si se pudiera controlar el crecimiento de los nanotubos de pared múltiple podrían darse características específicas a cada capa de forma que podrían construirse cables coaxiales, etc. La introducción de defectos en los nanotubos de carbono también puede servir para controlar sus propiedades electrónicas, como puede leerse en el artículo "[Defects in carbon nanotubes](#)".

La tendencia actual en electrónica es la **miniaturización** de los dispositivos para mejorar las prestaciones: aumento de velocidad, densidad y eficiencia. En este proceso ampliamente demandado, las tradicionales tecnologías de silicio están alcanzando el mínimo tamaño que se puede conseguir garantizando su correcto funcionamiento. Los nanotubos de carbono pueden desempeñar el mismo papel que el silicio en los circuitos electrónicos, pero a escala molecular donde el silicio y otros semiconductores dejan de funcionar. De hecho se espera que los nanotubos de carbono sean una pieza básica en lo que se denomina "electrónica molecular", que es aquella que utiliza moléculas como bloques de construcción para la fabricación de los dispositivos. Un único nanotubo de carbono, que es en realidad una única molécula, permite, como se verá en los apartados expuestos a continuación, el desarrollo de un dispositivo electrónico.

La electrónica a nivel molecular permitirá no sólo hacer más pequeños los dispositivos convencionales, sino también crear otros nuevos que aprovechen los **efectos cuánticos** propios de la reducida escala nanométrica en la que trabajan.

Hay algo más que pueden aportar los nanotubos de carbono a la electrónica: son excelentes **conductores del calor**, lo que los hace ideales disipadores del calor que se produce en los sistemas electrónicos.

Una característica importante de los dispositivos electrónicos que integran nanotubos es que **umentan su vida útil** debido básicamente a las propiedades mecánicas (resistencia mecánica, dureza, tenacidad, flexibilidad y elasticidad) y térmicas (buena conducción del calor y estabilidad estructural a altas temperaturas) de los nanotubos.

Un problema importante de las aplicaciones electrónicas de los nanotubos de carbono es que éstos son muy **susceptibles al ruido** causado por fluctuaciones eléctricas, térmicas y químicas, lo cual es muy positivo para su aplicación en sensores como se verá en el apartado [2.2. Sensores](#) de este informe, pero muy negativo para la electrónica.

En todos los casos el desarrollo de dispositivos electrónicos basados en nanotubos de carbono se realiza todavía de forma un tanto **artesanal**. Conectar un nanotubo a un electrodo requiere una mezcla de técnicas de litografía tradicionales para los electrodos

y el uso de microscopios de fuerza atómica para ver y manipular el nanotubo. Para conseguir una producción industrial de dichos dispositivos es necesario aun un importante avance en los métodos de crecimiento de los nanotubos y en la capacidad de hacerlos crecer directamente encima de diferentes materiales, silicio entre ellos, con orientaciones, formas y tamaños adecuados.

2.1.1 Nanocircuitos

El carácter metálico o semiconductor de los nanotubos de carbono los hace interesantes para su aplicación en nanocircuitos. Así los conductores pueden ser empleados como interconectores o nanocables y los semiconductores pueden utilizarse para desarrollar ciertos dispositivos como diodos y transistores (aunque veremos que algunos diodos también incorporan nanotubos metálicos). El hecho de que los nanotubos semiconductores puedan tener distintos gaps y distintas conductividades abre un extenso abanico de posibilidades para la fabricación de múltiples tipos de nanodispositivos.

2.1.1.1 Interconectores (nanocables)

En la miniaturización progresiva de la electrónica los cables también disminuyen su tamaño. Pero esto presenta dos problemas: se produce mucho calor y los cables se destruyen al ser bombardeados por la avalancha de electrones que supone el paso de una corriente. Los nanotubos de carbono se presentan como una opción interesante para solucionar estos problemas. Por un lado, las previsiones indican que **conducen el calor** tan bien como el diamante por lo que disipan fácilmente el calor a través de los contactos eléctricos de sus extremos (mejor cuanto más corto sea el nanotubo). Por otro lado, su **fortaleza estructural** les permitiría transportar enormes cantidades de corriente sin sufrir daños, incluso corrientes que podrían destruir el cobre o el oro. En el artículo "[Carbon nanotubes for interconnect applications](#)" se comparan las propiedades de los nanotubos de carbono con las de cables de oro equivalentes.

Diversos factores influyen en la resistencia de un nanotubo de carbono que se utiliza como nanocable.

Aunque todavía los científicos estudian cómo se mueven los electrones a lo largo de un nanotubo, parece ser que en nanotubos perfectos, sin ningún defecto, los electrones viajan "**balísticamente**" o sea, sin resistencia, sin ninguna dispersión que es la que origina la resistencia de los cables metálicos.

La conductividad de un nanotubo de carbono disminuye al aumentar el número de **defectos**, entre ellos las vacantes. Esto es debido al comportamiento mecano-cuántico

(ondulatorio) de los electrones dentro del nanotubo. Cuando un electrón rebota contra un defecto interfiere destructivamente, produciéndose una reducción en el flujo de electrones y por tanto un aumento en la resistencia. Este proceso de interferencia destructiva es mayor cuantos más defectos encuentre el electrón en su camino. Así, la presencia de tan sólo un 0,03% de vacantes es capaz de incrementar la resistencia eléctrica de un nanotubo de 400 nanómetros de longitud en más de mil veces.

Además, en un nanotubo de carbono con defectos aumenta la resistencia al disminuir el **diámetro** o al aumentar la **longitud**. Así, la resistencia del nanotubo con vacantes crece exponencialmente con su longitud mientras que en un hilo de cobre, por ejemplo, la resistencia crece linealmente con la longitud.

2.1.1.2 Diodos

Un diodo es un dispositivo electrónico que sólo permite el paso de corriente en un sentido.

Un diodo típico convencional es una unión p-n en la que un semiconductor extrínseco tipo p (dopado con aceptores – sustancias que aportan huecos) se une con un semiconductor extrínseco tipo n (dopado con donores – sustancias que aportan electrones), o mejor dicho, en un solo semiconductor un extremo se dopa con impurezasceptoras y otra con donoras. A grandes rasgos, el diodo sólo conducirá la electricidad cuando se conecte la parte p al polo positivo de una batería y la parte n al polo negativo (esta forma de polarización se llama “directa”), situación en la que los electrones pasan de la parte n, donde hay exceso de electrones, a la parte p donde hay exceso de huecos. Si se conecta la parte p al polo negativo y la parte n al polo positivo (“polarización inversa”) la corriente que atraviesa el diodo es prácticamente nula, aunque existe y se llama “corriente de saturación”.

Se pueden construir diodos con nanotubos de carbono de múltiples formas. Algunas de ellas se exponen a continuación:

- Se ha comprobado que **uniendo nanotubos metálicos y semiconductores** dichas uniones se comportan como diodos permitiendo que la electricidad fluya sólo en una dirección, como se comenta en el artículo “[Nanotubes for electronics](#)”.
- Se pueden construir diodos similares a las uniones P-N tradicionales utilizando **campos eléctricos** para conseguir regiones tipo p y otras tipo n, en lugar de dopar los nanotubos como se hace normalmente con los semiconductores normales. La unión p-n se consigue polarizando una mitad de un nanotubo con una tensión negativa y la otra mitad con una positiva. Además, al no tener un dopaje fijo, el diodo así construido puede cambiar dinámicamente de polaridad y pasar de ser p-n a n-p y viceversa. Polarizando de la misma forma ambas mitades se puede conseguir,

además, un transistor de canal p (ambas mitades polarizadas negativamente) o de canal n (ambas polarizadas positivamente). Así es el diodo desarrollado por la empresa General Electrics, como puede leerse en la noticia [“GE Global Research desarrolla el diodo de nanotubo de mejor rendimiento del mundo”](#).

- Se pueden construir dipolos **dopando** un nanotubo con aceptores en una mitad y con donores en la otra. De esta forma se tiene una unión p-n similar a las tradicionales pero con dimensiones nanoscópicas. Puede consultarse el artículo [“Electronic and transport properties of N-P doped nanotubes”](#).

2.1.1.3 Transistores

Un transistor es un dispositivo electrónico que, básicamente, tiene tres conexiones: fuente (“source”), colector (“drain”) y puerta (“gate”). Aplicando una corriente o una tensión, según los casos, a la puerta se controla la corriente que circula entre fuente y colector. Así, por ejemplo, en el transistor bipolar se aplica una corriente a la puerta mientras que en el transistor de efecto campo lo que se aplica a la puerta es un potencial. El primero se puede usar como amplificador (la pequeña corriente que se aplica a la puerta sale amplificada por el colector), mientras que un uso típico del segundo es como interruptor (con la tensión que se aplica a la puerta se pasa de conducción – on – a no conducción – off – entre fuente y colector).

Los nanotubos de carbono pueden emplearse para fabricar transistores a escala nanométrica. Algunos ejemplos se exponen a continuación.

2.1.1.3.1 Transistores de efecto campo

Se puede construir un **FET (Field Effect Transistor** o transistor de efecto campo) nanométrico colocando un nanotubo semiconductor entre dos electrodos metálicos que harían de fuente y colector. El flujo de electrones pasaría a través del nanotubo, y se controlaría aplicando los voltajes adecuados a un tercer electrodo situado cerca de él, la puerta, que produciría el campo eléctrico responsable de controlar la conductividad del nanotubo. Un FET construido de esta manera podría funcionar a temperatura ambiente de forma muy parecida a los fabricados con silicio. Sin embargo, debido a su pequeño tamaño consumiría mucha menos potencia.

A veces se hace referencia a los FET construidos con nanotubos como **NT-FET**.

El FET puede actuar como un interruptor lógico, pasando el nanotubo de conductor a aislante según los voltajes aplicados a la puerta. Un FET fabricado con un nanotubo de carbono puede efectuar conmutaciones ON-OFF y viceversa a una velocidad mucho

mayor (alrededor de 1000 veces) que la que se consigue con los mismos dispositivos fabricados en silicio. Este dato es muy importante para la fabricación de futuros ordenadores, basados en conmutaciones de este tipo.

Los siguientes artículos tratan sobre transistores de efecto campo basados en nanotubos de carbono:

- ["An 8-ghz f\(t\) carbon nanotube field-effect transistor for gigahertz range applications"](#).
- ["Carbon nanotube field-effect transistor operation at microwave frequencies"](#).
- ["Carbon nanotube field-effect transistors for high-performance digital circuits - transient analysis, parasitics, and scalability"](#).
- ["Calculations and applications of the complex band structure for carbon nanotube field-effect transistors"](#).

2.1.1.3.2 Transistores de electrón único

Un transistor **SET (Single-Electron Tunnelling** o transistor de electrón único) tiene, en lugar de tres, cuatro electrodos: fuente, drenaje, puerta e isla. La isla está separada de los otros tres electrodos por respectivas capas de material aislante. Los electrones pasan desde la fuente hasta el drenaje de uno en uno atravesando mediante efecto túnel las capas de aislante. El paso o no de electrones se controla mediante el voltaje que se aplica en el electrodo puerta. Recordamos aquí que el efecto túnel es un efecto propio de la mecánica cuántica y, por tanto, aplicable a escalas muy pequeñas, según el cual una partícula puede atravesar una barrera de potencial sólo por el hecho de existir una probabilidad no nula de que la partícula se encuentre al otro lado de la barrera, cuando desde el punto de vista de la mecánica clásica la partícula no tendría energía suficiente para atravesar dicha barrera.

Se puede fabricar un SET de dimensiones macrométricas sustituyendo la isla y las capas de aislante que la separan de fuente y drenaje por un único nanotubo de carbono. Se ha comprobado que, en determinadas circunstancias, se produce en los nanotubos un fenómeno llamado "bloqueo de Coulomb" que consiste en que un electrón que pretende entrar al interior de un nanotubo cuando ya hay otro electrón dentro sufre una repulsión. Los electrones pueden, por tanto, atravesar el nanotubo de uno en uno. El paso o no de electrones se controlaría mediante el voltaje aplicado desde un electrodo puerta cercano, como en el caso de un SET convencional.

Otra forma de desarrollar un SET a partir de un nanotubo de carbono es la descrita en la noticia ["Nanotube Single-Electron Transistor Works At Room Temperature"](#), publicada en

el año 2001 en *Chemical & Engeneering news*. En ella puede leerse cómo el grupo del profesor Cees Dekker en la Universidad de Delft desarrolló un transistor de electrón único sustituyendo la isla por una nanotubo de carbono metálico con sus dos extremos curvados, siendo éstos los que determinan que se produzca el efecto túnel característico de este tipo de transistores.

2.1.1.3.3 *Nanotubos en forma de Y*

Se puede conseguir un nanotubo con forma de Y controlando adecuadamente el proceso de crecimiento. Por ejemplo, en la Universidad de South California lo consiguen mediante el procedimiento de “chemical vapour deposition”; añadiendo partículas de hierro-titanio consiguen que salgan dos ramas a partir de otra principal, quedando las partículas en el interior de los nanotubos justo en el punto donde se unen las tres ramas.

Se ha comprobado que la corriente de electrones que circula entre las dos ramas secundarias puede ser controlada aplicando un voltaje a la rama principal. O sea, que el nanotubo se comportaría como un transistor y podría usarse como un interruptor lógico con características muy similares a los de silicio, pero con un tamaño mucho menor.

Estos transistores tienen una ventaja importante: no necesitan integrar nanotubos y silicio en el mismo dispositivo, lo cual presenta numerosas complicaciones, sino que están constituidos por sólo un nanotubo.

En el artículo [“Are electrical switching and rectification inherent properties of carbon nanotube y junctions?”](#) se cuestionan si las características propias de los nanotubos en forma de Y dependen de la presencia de partículas catalizadoras en la unión de las tres ramas o es una característica propia del nanotubo, para concluir, tras realizar los cálculos teóricos oportunos, que son independientes de la presencia o no de partícula catalizadora.

2.1.1.4 Interruptores

Los interruptores más frecuentes construidos con nanotubos de carbono son los **transistores** ya tratados en el apartado [2.1.1.3. Transistores.](#)

También se pueden construir interruptores nano-electro-mecánicos (**NEMS**) usando nanotubos y basados principalmente en fuerzas electrostáticas que moverían el nanotubo de una posición ON a otra OFF. Dado el tamaño nanométrico del dispositivo, intervienen también en este caso, aunque en menor medida, las fuerzas de Van der Waals, fuerzas de estabilización molecular resultantes de la atracción entre los pequeños dipolos atómicos que se forman debido al movimiento de los electrones alrededor del

núcleo. Aunque estos interruptores se mencionan en el apartado [2.8.5. NEMS](#), su descripción puede leerse en el apartado [2.1.4. Memorias](#), ya que la misma tecnología puede utilizarse como interruptor o como dispositivo de almacenamiento de datos.

2.1.2 Emisión de campo

La emisión de campo es una forma de **arrancar electrones de un sólido** mediante la aplicación de un **campo eléctrico** suficientemente fuerte.

Para conseguir que los electrones escapen de la superficie del sólido es necesario aplicarles energía. Hay diversas formas de suministrar esa energía. Así, por ejemplo, en la emisión termoiónica la energía proviene del calor y los electrones se emiten desde un material incandescente; en el efecto fotoeléctrico es una radiación electromagnética incidente sobre el emisor la que proporciona a los electrones la energía necesaria para escapar. En la emisión de campo, sin embargo, al aplicar un campo eléctrico suficientemente elevado al emisor los electrones escapan hacia el exterior mediante la formación de **túneles cuánticos** que les permiten atravesar la barrera de potencial de la superficie. Como se comentó en el apartado [2.1.1.3.2. Transistores de electrón único](#), los túneles cuánticos permiten que partículas con energía insuficiente para atravesar una barrera de potencial la atraviesen debido a la probabilidad no nula de que se encuentren al otro lado. En la emisión de campo, el campo eléctrico propicia la aparición del efecto túnel.

La emisión de campo depende de las propiedades del material emisor y de su forma; así para un material y un campo eléctrico dados, cuanto más **alargado** y **estrecho** sea el emisor mayor será la corriente de electrones obtenida.

Los nanotubos de carbono son excelentes emisores de campo, presentando ciertas ventajas frente a otros materiales. En primer lugar, emiten electrones a voltajes más bajos que otros electrodos debido a su forma alargada casi unidimensional. Además, debido a la fuerza con que los átomos de carbono se unen entre sí, tienen una **vida útil** mucho mayor ya que son muy estables ante corrientes elevadas.

El principal inconveniente del uso de los nanotubos de carbono como emisores de campo es que sus propiedades emisoras dependen totalmente de su **estructura** y, por tanto, del proceso de síntesis utilizado.

La corriente de electrones emitida por un nanotubo de carbono puede verse modificada por la **adsorción** de moléculas de diferentes sustancias en su superficie (como se expone en el artículo "[Field emission properties of carbon nanotubes and their application to display devices](#)") y por la **presión** de la cámara en la que se encuentra; esto último puede utilizarse para desarrollar sensores, como puede verse en el apartado [2.2. Sensores](#).

También los **defectos** en los nanotubos producen cambios en la emisión de electrones, como puede leerse en el artículo "[Emission property of carbon nanotube with defects](#)".

Hay múltiples aplicaciones posibles en las que se pueden emplear los nanotubos de carbono como fuentes de electrones. El término "**electron gun**" (traducido frecuentemente como "**cañón de electrones**") es ampliamente utilizado en la literatura para referirse a las fuentes de electrones.

Se exponen a continuación las aplicaciones detectadas durante la realización de este informe.

2.1.2.1 Pantallas planas

Las pantallas planas son una de las aplicaciones más prometedoras de los nanotubos de carbono como emisores de campo.

Durante mucho tiempo se ha pensado en la emisión de campo para las pantallas planas de televisores y ordenadores pero siempre se ha tropezado con el problema de que los emisores son extremadamente delicados. Los nanotubos de carbono con su extraordinaria **estabilidad estructural** pueden ser la solución a este problema. Presentan, además, numerosas ventajas frente a los "liquid crystal displays" (LCD): menor consumo, mayor brillo, mayor ángulo de visión, y rápida respuesta.

La idea de un display plano fabricado con nanotubos es muy sencilla: el cátodo incorpora nanotubos dispuestos con sus puntas orientadas hacia el ánodo y éste, separado una cierta distancia del primero, se cubre con un material catodoluminiscente que emite luz cuando impactan los electrones contra él. Controlando electrónicamente el campo eléctrico que se aplica sobre los nanotubos se produce la imagen deseada.

El cátodo emisor se puede construir de varias maneras. Por ejemplo, dispersando los nanotubos en una **matriz plástica** y usando el compuesto así creado para cubrir un electrodo sobre el que se aplica voltaje, los nanotubos que casualmente hayan caído con sus puntas orientadas hacia el ánodo serán emisores de electrones. También se pueden crecer los nanotubos directamente en **arrays**, formando "bosques" en los que todos tendrían sus puntas orientadas hacia el ánodo y, por tanto, todos serían emisores.

El prototipo construido por la Universidad de Northwestern ("[Applications of carbon nanotubes](#)"), consiste en colocar tiras de resina epoxy con nanotubos sobre el cátodo y tiras de tinoxido de indio sobre el ánodo. Los píxeles se forman en la intersección de las tiras del cátodo y las del ánodo. Para una distancia de 30 μm entre el cátodo y el ánodo, se necesitan 230V para conseguir la densidad de corriente necesaria para crear una imagen (76 $\mu\text{mA}/\text{mm}^2$).

2.1.2.2 Lámparas y tubos luminiscentes

Las lámparas de nanotubos de carbono se basan en la misma idea que los displays planos: un cátodo que incorpora nanotubos emisores de electrones que impactan sobre un ánodo cubierto de un material catodoluminiscente. El impacto de los electrones produce luz. En este caso sólo se busca luz, no una imagen, por lo que no es necesaria la electrónica propia de las pantallas planas.

Las lámparas así construidas son más **eficientes** (más de 10 veces) que las tradicionales, más **brillantes** y con una **vida** más larga (mayor de 8000 horas). Por ello se plantean como alternativa a las lámparas fluorescentes convencionales que usan **mercurio** altamente contaminante para el medio ambiente.

En el artículo "[Printed carbon nanotube field emitters for backlight applications](#)" se comenta el uso de estas lámparas para la unidad de iluminación trasera de pantallas LCD, donde se espera que produzcan importantes reducciones de coste, al menos en pantallas de gran tamaño.

2.1.2.3 Tubos de rayos catódicos

Un tubo de rayos catódicos es, como su nombre indica, un tubo en el que un emisor de electrones envía electrones hacia una pantalla recubierta con material catodoluminiscente que emite luz con una intensidad proporcional a la cantidad y velocidad de electrones incidentes. Entre el emisor de electrones y la pantalla hay un sistema deflector (magnético o electrostático) que permite desviar el haz de electrones verticalmente y horizontalmente de forma que se puedan recorrer todos los puntos de la pantalla de forma consecutiva. La rapidez con que se recorre la pantalla impide al ojo humano darse cuenta de que en realidad los píxeles se iluminan uno a uno. Las voluminosas pantallas tradicionales de TV, ordenadores, osciloscopios, etc. están fabricadas con tubos de rayos catódicos.

Los nanotubos de carbono como emisores de campo pueden ser la fuente de electrones en los tubos de rayos catódicos. Un ejemplo serían los fabricados por la empresa Ise Electronic Co. en Japón, como se menciona en el artículo "[Applications of carbon nanotubes](#)".

2.1.2.4 Litografía por haz de electrones

La litografía por haz de electrones (**EBL – Electron Beam Litography**) o electrolitografía es una técnica especializada para crear **plantillas** extremadamente finas, fundamentales para la fabricación de los modernos circuitos electrónicos.

La técnica consiste en cubrir la oblea sobre la que se quiere trabajar con una película sensible a los electrones. Mediante una fuente de electrones se “dibuja” sobre la película la plantilla que se pretende crear. La zona bombardeada con electrones sufre ciertos cambios estructurales. Posteriormente se somete el conjunto a la acción de una solución líquida que o bien disolverá la película protectora sólo en zona expuesta a los electrones (litografía positiva) o bien la no expuesta (litografía negativa), dejando al descubierto la oblea sólo en las zonas que nos interesan para su posterior procesado.

La ventaja sobre la fotolitografía (es el mismo proceso pero utilizando luz visible o ultravioleta en lugar de electrones) es que tiene una **resolución** mucho mayor al no haber difracción. El principal inconveniente es que es un proceso más **lento** ya que en la litografía por haz de electrones la plantilla se dibuja en lugar de usar máscaras como ocurre en la fotolitografía.

Los nanotubos de carbono como emisores de electrones pueden ser utilizados para esta aplicación, como se comenta en el artículo [“Carbon nanostructures on silicon substrates suitable for nanolithography”](#).

2.1.2.5 Fuentes de rayos X

Cuando se bombardea un metal con electrones, el metal emite rayos X. Por tanto, se puede fabricar una fuente de rayos X con un cátodo emisor de electrones que bombardean un ánodo metálico. El mecanismo es similar al ya descrito en el caso de las pantallas planas, lámparas y tubos luminiscentes y tubos de rayos catódicos, pero sustituyendo el material luminiscente del ánodo por un metal.

Las fuentes de rayos X convencionales usan emisores termoiónicos que alcanzan **temperaturas** de hasta 2 000 °C. Los nanotubos de carbono, usando su propiedad de ser emisores de campo, pueden reemplazar a los emisores termoiónicos en esta aplicación. Las ventajas que ofrecen son: mayor **vida útil** (los emisores termoiónicos funcionan durante tiempos relativamente cortos debido a las altas temperaturas que alcanzan), y mayor **eficiencia** energética. Además, al trabajar a temperatura ambiente, permiten construir fuentes de rayos X **portátiles** que podrán usarse en ambulancias, para detectores de seguridad en aeropuertos y otros edificios, etc.

El artículo [“Acquisition of x-ray images by using a CNT cold emitter”](#) trata sobre este tema.

2.1.2.6 Amplificadores de microondas

En un amplificador de microondas convencional un cátodo incandescente genera una corriente continua de electrones, que atraviesan una bobina a la que se aplica la señal

RF que se quiere amplificar. Los electrones, sometidos al campo eléctrico creado por la bobina modulan su velocidad y se crean grupos de electrones con velocidades diferentes. Estos grupos atraviesan una segunda bobina en la que al pasar los electrones y según las características de la bobina se genera la señal RF amplificada, que será transmitida a una antena para su difusión.

La eficiencia de este sistema es pequeña y disminuye al aumentar la frecuencia de la señal RF.

El emisor termoiónico puede ser sustituido por nanotubos de carbono. Aparte de no tener que calentarlos, emiten directamente los electrones en grupos pudiendo conmutar entre estados ON y OFF según la señal RF de entrada (este proceso se llama “modulación temporal”). Este sistema permite eliminar la primera bobina de los amplificadores convencionales, lo que reduce en 2/3 el **volumen** total. Además, el **colector** final de los electrones también se simplifica ya que llegan menos electrones. Esto es debido a que en el amplificador convencional sólo alrededor de un 30% de los electrones del haz inicial se incorporan a los grupos, mientras que todos los electrones emitidos forman parte de ellos en el caso de los nanotubos. El resultado es una reducción en **peso** lo cual permitiría, por ejemplo, enviar satélites más pequeños al espacio (con el consiguiente ahorro económico) o bien aumentar el número de amplificadores embarcados.

Para que la utilización de los nanotubos de carbono como emisores en amplificadores de microondas sea eficiente es necesario poder crear **arrays** en los que todos los nanotubos sean lo más parecidos posible en **forma y tamaño** para conseguir emisiones similares de todos ellos. Además, es necesario que estén bien cristalizados para que tengan una alta **conductividad eléctrica**. Es decir, también esta aplicación, como la mayoría, depende de la calidad en el proceso de crecimiento de los nanotubos.

En el artículo [“Aligned carbon nanotubes/fibers for applications in vacuum microwave amplifiers”](#) se describe un amplificador de microondas basado en nanotubos de carbono en el que se obtendrían densidades de corriente del orden 1 A/cm^2 a 1.5 GHz, mientras que en [“Aligned carbon nanotubes/fibers for applications in vacuum microwave devices”](#) se habla de un amplificador capaz de producir una potencia de 10 W a 30 GHz.

2.1.2.7 Tubos de descarga de gas en redes de telecomunicaciones

Los tubos de descarga de gas consisten en dos electrodos paralelos colocados en el interior de una caja cerámica sellada y llena de una mezcla de gases nobles. Se usan para proteger circuitos de excesos de voltaje transitorios como el que ocurre, por ejemplo, tras la caída de un rayo. Estos tubos son aislantes en condiciones normales. Cuando hay un exceso de voltaje se produce una descarga entre los electrodos que

convierte la mezcla de gases en un plasma conductor que cortocircuita el sistema y protege a los componentes de posibles daños. Son sistemas robustos, baratos y que no interfieren con el funcionamiento del sistema.

Incorporando nanotubos de carbono como elementos de descarga en los electrodos se comprueba que se obtienen resultados mejorados respecto a los tubos de descarga convencionales. Como puede leerse en el artículo "[Application of carbon nanotubes as electrodes in gas discharge tubes](#)", los tubos de descarga con nanotubos de carbono en sus electrodos reducen el **voltaje de ruptura** (aquel para el que se produce la descarga en el tubo) para corriente continua y disminuye las **fluctuaciones** del mismo. Esto los hace aptos para aplicaciones en las que no son válidos los tubos de descarga convencionales, como el ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) y el HDSL (High-bit-rate Digital Subscriber Line).

2.1.2.8 Microscopios electrónicos de barrido

En el microscopio electrónico de barrido (**SEM – Scanning Electron Microscope**) un haz de electrones muy concentrado generado por una fuente emisora y enfocado y dirigido mediante lentes magnéticas se proyecta sobre la muestra a explorar y la recorre punto por punto, siendo el tamaño de la zona bombardeada de unos pocos nanómetros (típicamente entre 1 y 5 nm). Los electrones incidentes, llamados electrones primarios, tienen energías comprendidas entre unos cientos de eV y 100 KeV. Al alcanzar la muestra interactúan con los átomos de ésta hasta una profundidad que oscila entre algo menos de 100 nm y unas 5 micras, dependiendo de las características del haz y de la muestra. Como resultado de dicha interacción se desprenden de la muestra distintos elementos: electrones secundarios, electrones dispersados, electrones reflejados, rayos x, luz visible, etc. Un SEM puede tener detectores para cada tipo de señal producida, pero lo más frecuente es detectar los **electrones secundarios**. De éstos se analizan los de baja energía (unos 50 eV) que son los generados a unos pocos nanómetros de la superficie. La información recogida de cada punto bombardeado en la muestra es procesada electrónicamente y convertida en un píxel de una pantalla. Rastreando la muestra se consigue una imagen completa de ésta. El resultado es una imagen tridimensional de la superficie.

La resolución de un microscopio depende de la longitud de onda de la radiación que se utiliza, de forma que si la distancia que separa dos puntos es menor que la longitud de onda de la radiación que los ilumina no será posible diferenciarlos. Esto determina que la **resolución** de un SEM sea mucho mayor que la de un microscopio óptico: la longitud de onda asociada a los electrones que se usan en este tipo de microscopios es de unos 0,5 ángstroms, mientras que en el caso de la luz visible está comprendida entre 400 y 700 nm.

Como principales inconvenientes pueden citarse que los SEM tienen que trabajar en **vacío** para evitar que las moléculas de aire dispersen los electrones primarios, son muy sensibles a **vibraciones** y a **campos electromagnéticos** externos, y necesitan **fuentes muy estables** tanto de electrones como de voltajes para alimentar las lentes magnéticas. Además, el resultado es mucho mejor si la **muestra es conductora**, por lo que si aquella no cumple esta condición se recurrirá a cubrirla con una fina capa de metal, lo que puede alterar la muestra si esta es muy delicada e implica que, en el caso de muestras biológicas, sólo puedan observarse organismos muertos.

La fuente de electrones que se utiliza normalmente en los SEM es un emisor termoiónico. Los nanotubos de carbono pueden utilizarse como emisores de campo para este tipo de aplicación, como se comenta en el artículo "[Carbon nanotubes as electron sources](#)".

2.1.2.9 Nanotriodos

Un triodo es un tubo de vacío en cuyo interior hay un cátodo cargado negativamente que emite electrones, un ánodo cargado positivamente que los atrae y, situada en algún punto entre ambos, una rejilla a la que se le aplica una tensión y a través de la cual pasan los electrones. Según el valor de la tensión que se aplica a la rejilla se controla el flujo de electrones que viaja del cátodo al ánodo. La rejilla permite, por tanto, que el triodo sea un amplificador y, además, un interruptor que conmuta de estado ON a OFF según deje pasar la corriente o no.

Los emisores de electrones de los triodos convencionales son emisores termoiónicos. Éstos pueden ser sustituidos por emisores de campo como los nanotubos de carbono. El empleo de éstos últimos en concreto permitiría, además, fabricar nanotriodos, es decir, triodos de tamaño nanométrico que podrían emplearse como amplificadores o interruptores de reducido tamaño en MEMS (MicroElectroMechanical Systems, ver apartado 2.8.6. MEMS) o NEMS (NanoElectroMechanical Systems, ver apartado 2.8.5. NEMS). Así, en el artículo "[Modeling of field emission nanotriodes with carbon nanotube emitters](#)" se propone el desarrollo de un nanotriodo de unos 100 nm de tamaño.

2.1.2.10 Betatrones

En el artículo "[Possible application of carbon nanotubes to the field emission electron source for portable betatrons](#)" se habla de la posibilidad de usar los nanotubos de carbono como fuentes de electrones en betatrones.

Un betatrón es un acelerador de partículas beta, o sea, un acelerador de electrones ya que las partículas beta no son más que electrones de alta velocidad y alta energía.

El betatrón fue inventado por D.W.Kerst en 1941. En su estructura más básica consiste en un tubo toroidal en cuyo interior se hace el vacío. En él se inyectan electrones con cierta velocidad. A través de la sección del toro se hace pasar un campo magnético variable en el tiempo que crea un campo eléctrico y éste acelera los electrones en su movimiento a lo largo del tubo. En un momento dado los electrones se deflecan para llevarlos a su destino. Si se les hace incidir con un metal puede dar lugar a una fuente de rayos X, como se ha comentado en el apartado 2.1.2.5. Fuentes de rayos X. Impactando con los materiales adecuados pueden generar otro tipo de radiaciones que se usan en terapias médicas, por ejemplo, contra el cáncer. El betatrón también puede utilizarse simplemente como herramienta para estudiar las características de los electrones.

La ventaja de usar nanotubos de carbono como fuente de electrones es que permitiría el desarrollo de betatrones **pequeños y portátiles**, como se comenta en el artículo antes mencionado.

2.1.3 Filtros RF

Los nanotubos de carbono pueden usarse como filtros RF. Se exponen a continuación dos posibles formas de conseguirlo.

En primer lugar, se pueden construir filtros RF muy pequeños mediante **arrays de nanotubos de carbono metálicos** dispuestos de forma similar a las cerdas de un cepillo y encastrados en guías de onda microstrip de forma que los nanotubos queden perpendiculares al eje principal de la guía de ondas. Este sistema resonante vibrará ante señales comprendidas en cierto ancho de banda cuya frecuencia central se llama frecuencia de resonancia. La deformación de los nanotubos se produce por la fuerza de Coulomb ejercida por la señal RF sobre sus cargas. El resto de las frecuencias son reflejadas por los nanotubos metálicos. Los nanotubos así colocados constituyen un resonador mecánico muy eficiente, con alto factor de calidad Q (cociente entre la frecuencia de resonancia y el ancho de banda). El resultado es, por tanto, un filtro pasa banda de banda estrecha. La frecuencia de resonancia de los nanotubos se puede cambiar inyectando o retirando densidad de carga en los nanotubos (p.ej. mediante un condensador), o sea, que el filtro es sintonizable. De esta manera se obtienen filtros pasivos basados en resonadores electromecánicos con un tamaño adecuado para ser integrados, solucionando así el problema del gran tamaño (excesivo para ser integrados) de los que se usan actualmente en sistemas de comunicaciones.

En segundo lugar, los nanotubos de carbono tienen comportamiento inductivo y capacitivo, además de resistivo, lo que puede utilizarse para construir **circuitos LCR** y, entre ellos, filtros RF con buenos resultados cuando se trabaja a altas frecuencias. Los filtros pasivos LCR son muy utilizados en aplicaciones donde no son aptos los filtros

activos porque se necesita gran margen dinámico (relación señal/ruido) y bajo ruido. Sin embargo normalmente los filtros LCR son demasiado grandes debido al tamaño del inductor y son difíciles de integrar. Por otro lado, los filtros pasivos que usan resonadores electromecánicos, muy utilizados en sistemas de comunicaciones, normalmente trabajan a frecuencias muy bajas, son caros y también son grandes para integrarlos. Los filtros pasivos LCR fabricados con nanotubos de carbono solucionarían todos estos problemas. En el artículo "[A carbon nanotube film as a radio frequency filter](#)" de Nina A. Prokudina, Evgenii R. Shishchenko, Oh-Shim Joo, Kyung-Hee Hyung and Sung-Hwan Han de la Universidad de Hanyang en Corea del Sur describen la fabricación de una película que contiene nanotubos de carbono y que funciona como filtro elimina-banda con una frecuencia central de 18 MHz.

2.1.4 Memorias

Las memorias fabricadas con nanotubos de carbono podrían ser una alternativa interesante a las actuales memorias RAM de nuestros ordenadores. Para empezar serían memorias **no volátiles**. Además, serían más **rápidas**, **baratas**, **resistentes a la radiación**, con una **vida** casi ilimitada, con **gran capacidad** de almacenamiento de datos y con **menor consumo** que las actuales.

Existen diferentes formas de construir memorias con nanotubos de carbono. Citaremos aquí sólo algunos ejemplos.

La empresa estadounidense [Nantero](#) muestra en su página web su prototipo de memoria basada en nanotubos de carbono y fabricada con procesos estándar en el mundo de los semiconductores. Fabrican **nanotubos sujetos por ambos extremos de unos interconectores y suspendidos a una altura de unos 10 nm sobre un electrodo**. Cuando se aplica un campo eléctrico adecuado al nanotubo mediante una diferencia de potencial entre el electrodo y los interconectores, algunos de los átomos del nanotubo se mueven y éste se curva de forma similar a una catenaria debido a fuerzas electrostáticas hasta que su parte central toca el electrodo inferior cerrando el circuito. El nanotubo suspendido representa el estado OFF o el 0 lógico y el nanotubo en contacto con el electrodo el estado ON o 1 lógico. Una vez que el nanotubo está en contacto con el electrodo, las fuerzas de Van der Waals prevalecen sobre las elásticas y mantienen el contacto incluso cuando el campo eléctrico desaparece, lo que permite que estas memorias sean no volátiles.

También sería posible fabricar una memoria con **nanotubos unidos sólo por un extremo a un electrodo y dispuestos de forma horizontal**. Por debajo y, a cierta distancia habría un segundo electrodo. Aplicando una diferencia de potencial entre ambos y aprovechando la deformación que se produce en el nanotubo ante la acción de un campo eléctrico, el nanotubo se inclinaría por su extremo libre hasta llegar a

tocar el electrodo, cerrando el circuito. El circuito abierto sería el estado "OFF" y el cerrado el estado "ON". En el artículo "[Nanoelectromechanical Systems: Experiments and Modeling](#)" puede leerse una pequeña descripción de esta tecnología aplicada a interruptores (en muchos casos interruptores y memorias se construyen de formas muy similares).

Otro ejemplo sería la propuesta de la Universidad de California de construir memorias usando nanotubos de carbono **telescopicos**. Introduciendo un nanotubo en el interior de otro ligeramente mayor, los científicos pueden conseguir movimientos telescópicos y obtener así incluso 3 estados lógicos mediante 2 electrodos situados en ambos extremos de los dos nanotubos concéntricos. En ausencia de campos eléctricos los dos nanotubos permanecen unidos por la fuerza de Van der Waals. Si se aplican voltajes de signos opuestos a uno de los electrodos y al nanotubo interno, la fuerza electrostática vencerá a la de Van der Waals y el nanotubo interno saldrá disparado hacia el electrodo con carga opuesta hasta hacer contacto con él. Según el electrodo que se cargue se consiguen dos estados diferentes (nanotubo interno en contacto con el electrodo de la derecha o con el de la izquierda); estos, junto con el estado de reposo con ambos nanotubos unidos permite una lógica de tres estados con las posibilidades de almacenamiento de datos que ello conlleva. La noticia titulada "[Telescoping nanotubes offer new option for nonvolatile memory](#)" habla sobre este tema.

Por último otra interesante posibilidad para el almacenamiento de datos es introducir partículas de hierro en el interior de nanotubos de carbono. El conjunto así formado tiene propiedades **ferromagnéticas**, lo que lo hace apto para la fabricación de memorias magnéticas similares a las convencionales pero permitiendo mayores densidades de almacenamiento. Los artículos "[Iron filled single-wall carbon nanotubes - a novel ferromagnetic medium](#)" y "[Synthesis and magnetic study for Fe-doped carbon nanotubes \(CNTS\)](#)" tratan sobre este tema. En el artículo "[Synthesis and properties of filled carbon nanotubes](#)" se consideran también otros materiales ferromagnéticos como el níquel o el cobalto para dopar los nanotubos de carbono consiguiendo así no sólo dispositivos de almacenamiento sino también excelentes nanocables metálicos protegidos de la oxidación por los nanotubos que los envuelven. Las partículas magnéticas también podrían situarse en la superficie del nanotubo en lugar de hacerlo en su interior, como se comenta en el artículo "[Controllable synthesis and magnetic properties of Fe-Co alloy nanoparticles attached on carbon nanotubes](#)".

2.1.5 Optoelectrónica

Los dispositivos optoelectrónicos convierten la luz en electricidad y viceversa. Por ello los elementos clave de su funcionamiento serían antenas que en lugar de trabajar con ondas de radio trabajaran con señales de frecuencias correspondientes al rango visible.

Una antena dipolo de radiofrecuencia consiste en dos hilos conductores rectilíneos de igual longitud y colineales con radio mucho menor que su longitud y separados una mínima distancia en la que se coloca un generador o una línea de transmisión. La longitud total de un dipolo es la mitad de la longitud de onda de su frecuencia de resonancia (realmente alrededor de un 95% de dicha longitud debido a efectos de borde en las puntas).

Podría pensarse que los nanotubos de carbono, dada su estructura casi unidimensional, podrían ser los hilos radiantes de una antena dipolo. Las investigaciones demuestran que esto es cierto para longitudes de onda de la luz visible: los nanotubos de carbono **al ser iluminados con luz visible generan corrientes eléctricas**. Al incidir los fotones sobre el nanotubo se separan las cargas positivas y negativas generando así la corriente. Aparte de su utilidad en el desarrollo de dispositivos optoelectrónicos, estas antenas de luz visible podrían utilizarse, por ejemplo, para recibir señales de televisión transportadas por un haz láser que se propaga por una fibra óptica, mejorando así la eficiencia y la calidad de las señales de televisión. Podrían, además, ser la base para la construcción de generadores fotovoltaicos muy eficientes, con las ventajas energéticas que esto supondría. Además, los dipolos individuales podrían utilizarse como elementos radiantes individuales de arrays, con los beneficios propios de este tipo de antenas.

El efecto inverso también se ha demostrado: **si se inyectan cargas positivas y negativas en un nanotubo, al recombinarse se produce emisión de luz**.

En la noticia titulada "[Single-nanotube photodetector](#)" publicada en julio de 2003 en *Chemical & Engineering news*, se comenta cómo la empresa IBM consiguió ambas cosas: producir una corriente al iluminar un nanotubo de carbono y que éste emita luz cuando se le inyectan cargas.

2.1.6 Grabado (etching)

Los nanotubos de carbono pueden ser utilizados para el grabado (etching) de nanotrincheras de anchura inferior a los 10nm en obleas de SiO_2 . En el artículo "[Carbon nanotube guided formation of silicon oxide nanotrenches](#)" describen el procedimiento utilizado en la Universidad Pohang de Ciencia y Tecnología de la República de Corea para conseguirlo. Explican cómo nanotubos de carbono de pared simple crecidos por el método CVD pueden ser utilizados como fuente de carbono, sustancia que reduce el SiO_2 a su estado gaseoso. Se obtendrían así nanotrincheras con el tamaño y la forma del nanotubo utilizado. Estas nanotrincheras pueden ser utilizadas por ejemplo, para la fabricación de nanocables con unas dimensiones difíciles de conseguir mediante otras técnicas de grabado.

2.1.7 Espintrónica

La electrónica utiliza la carga de los electrones para generar corrientes y en función de éstas y de sus valores maneja y transmite información. Pero desde hace años se conoce **otra propiedad de los electrones** que también puede ser aprovechada en el almacenamiento y tratamiento de datos, es el **Espín**.

El concepto de espín se introdujo en la teoría de la Mecánica Cuántica en los años 20 para justificar los espectros de algunos átomos, y se puede entender como la **rotación del electrón sobre su propio eje** (de la misma manera que la Tierra tiene un movimiento de giro sobre sí misma además de en torno al Sol). Debido a que el electrón es una partícula cargada este movimiento de rotación sobre su eje debe **generar un momento magnético** y esta propiedad es la que permite interactuar con el espín mediante campos magnéticos.

Se denomina espintrónica (o también electrónica del espín) a la tecnología que permite aprovechar el espín de los electrones además de su carga para aumentar las posibilidades de la electrónica.

Para poder aprovechar la propiedad del espín es necesario disponer, por un lado de dispositivos que generen corrientes de **electrones polarizados en espín** (es decir, que tengan el mismo valor de espín) y, por otro de dispositivos que sean capaces de detectar el valor del espín. En el desarrollo de los dispositivos que “polarizan el espín” se están utilizando **materiales ferromagnéticos**, ya que al aplicarles un campo magnético tienden a alinear sus espines con éste y se pueden considerar como “fuentes de espín”.

Pero una vez lograda la “fuente de espín” **es necesario proteger estas partículas con espín controlado** ya que a medida que sufren colisiones pueden perder el valor inicial de espín. **Los CNT pueden colaborar en esa tarea.**

En el artículo [Magnetism of transition-metal/carbon-nanotube hybrid structures](#) realizado en 2003 entre la Chang Gung University china y la University of North Carolina, se estudian **estructuras híbridas CNT-Metal de transición** (En concreto utilizan Cobalto) para el transporte de espín. La estructura puede estar formada tanto con el Cobalto en el interior del CNT como situado en su superficie externa.

Sobre este mismo tema se ha publicado recientemente en **Nature** el artículo [‘Transformation of spin information into large electrical signals using carbon nanotubes’](#) realizado entre otros por **J.M. Pruneda del ICMA (CSIC)**. También de este mismo autor se puede tener acceso al artículo más general, [‘Molecular-Spintronics: the art of driving spin through molecules’](#).

2.2 Sensores

Un sensor es un dispositivo que detecta cierta característica del medio externo, la transforma en otra que pueda ser fácilmente transmisible, medible y procesable, y transmite ésta última al dispositivo de control correspondiente. Realiza, por tanto, dos labores fundamentales: detección y transducción. El detector y el transductor pueden ser elementos separados o estar ambos integrados en el transductor. Es muy habitual que la característica a medir se transforme en magnitudes eléctricas, ya que éstas son fácilmente manipulables.

Los nanotubos de carbono se presentan como una opción interesante para la fabricación de sensores de **pequeño tamaño, portátiles, rápidos** y de **bajo consumo**.

En muchos casos, aunque no siempre, se aprovecha la circunstancia de que las propiedades eléctricas de los nanotubos de carbono dependen fuertemente de su estructura atómica y electrónica y cualquier modificación de origen físico o químico que se produzca en ésta provocará un cambio en dichas propiedades. Midiendo el cambio tendremos un reflejo de la característica que lo provocó.

En la siguiente tabla se ofrece un resumen de la propiedad de los nanotubos que se aprovecha para cada tipo de sensor.

<i>Propiedad</i>	<i>Tipo de sensor</i>
Cambio en la resistencia y capacidad al reaccionar químicamente con ciertas sustancias.	Sensores químicos.
Cambio en la resistencia provocado por fuerzas electrostáticas procedentes del exterior.	Sensores químicos de sustancias cargadas.
Cambio en la resistencia al ser sometidos a fuerzas mecánicas (presión, curvado, torsión): piezorresistividad.	Sensores mecánicos.
Cambio en la frecuencia de vibración al ser sometidos a una fuerza.	Sensores mecánicos resonantes.
Aumenta la resistencia con la temperatura.	Sensores térmicos.
Producen corriente eléctrica al ser calentados con determinadas longitudes de onda del espectro infrarrojo: piroelectricidad.	Sensores térmicos.
Producen corriente eléctrica al ser iluminados.	Sensores electromagnéticos.
Presentan fotoluminiscencia.	Sensores electromagnéticos.
Absorben luz visible e infrarroja.	Sensores electromagnéticos.
Emiten electrones cuando se estimulan con microondas.	Sensores electromagnéticos.
La corriente de electrones emitida (emisión de campo) depende de la presión de la cámara.	Sensores de presión por emisión de campo.

Desarrollamos brevemente a continuación los distintos tipos de sensores que pueden incorporar nanotubos de carbono, clasificados en función del **parámetro que detectan**:

2.2.1 Sensores químicos y biológicos

Los sensores químicos se usan para detectar la **presencia de determinadas sustancias en un entorno dado**. Para ello se usan técnicas muy diversas, desde reacciones químicas con el analito o sustancia a analizar hasta cambios de propiedades físicas de todo tipo producidas en el detector del sensor ante la presencia del material que se pretende detectar.

Los sensores químicos que se utilizan en entornos **biológicos** y los usados para la detección de **contaminantes** despiertan gran interés en la comunidad científica por sus potenciales beneficios para la salud y el medioambiente.

En muchas ocasiones los sensores químicos desarrollados a partir de nanotubos de carbono basan su funcionamiento en la propiedad que tienen éstos de cambiar sus propiedades eléctricas, en concreto su **resistencia** y su **capacidad**, al **reaccionar químicamente** con las sustancias que se pretende detectar. Pueden existir diferentes mecanismos de reacción. Una posibilidad es utilizar nanotubos con defectos de forma que las moléculas a detectar ocupen los huecos. Incluso se producen cambios en la capacidad del nanotubo si éste se recubre con otra sustancia que, de alguna manera, atrape a las moléculas a detectar, de forma que éstas se quedan en la superficie del nanotubo pero sin interactuar directamente con él.

Los nanotubos de carbono también pueden detectar la presencia de sustancias que tengan cierta carga, basándose en que la **resistencia** de los nanotubos depende del número de cargas libres en su interior y éste número se puede alterar mediante **fuerzas electrostáticas** que proceden del exterior.

En ocasiones la función de los nanotubos de carbono en los sensores no es ser el detector sino **mejorar las prestaciones** de ciertos materiales que se usan para realizar dicha función. Así, por ejemplo, en la reacción química que tiene lugar entre el analito y el electrodo del detector en sensores electroquímicos pueden hacer de catalizadores o facilitar el intercambio de electrones en una reacción de oxidación-reducción, como se comenta en el artículo ["A conductive ormosil encapsulated with ferrocene conjugate and multiwall carbon nanotubes for biosensing application"](#).

Los sensores químicos de nanotubos de carbono son **rápidos** y, a temperatura ambiente, mucho más **sensibles** que otros tipos de sensores usados actualmente. Debido a su **pequeño tamaño** y rapidez tendrán un papel muy importante en redes de seguridad y en control medioambiental.

2.2.2 Sensores mecánicos

Se utilizan para detectar **fuerzas** de todo tipo y medir así o bien dichas fuerzas, o bien multitud de parámetros que se asocian a ellas. Se pueden citar como ejemplos los sensores acústicos, de flujo, de velocidad y de masa.

Los nanotubos de carbono pueden ser utilizados como sensores mecánicos ya que al ser sometidos a una fuerza se producen pequeños desplazamientos en su estructura atómica y se alteran sus propiedades eléctricas. Así, al presionar, retorcer o curvar un nanotubo se producen cambios en su resistencia, o sea, son **piezorresistivos**.

Los sensores mecánicos también se pueden construir con dispositivos **resonantes**: un cantilever que vibra puede medir la fuerza que se le aplica en su extremo libre por los cambios que se producen en la frecuencia, amplitud o fase de la vibración. Se puede utilizar un nanotubo de carbono como elemento vibrante. Así, por ejemplo, podrían fabricarse sensores de masa con resolución de 1 attogrammo. La vibración del nanotubo puede ser conseguida mediante la aplicación de un voltaje variable adecuado que produzca las atracciones y repulsiones correspondientes. En el artículo "[Effect of defects on resonance of carbon nanotubes as mass sensors](#)" puede leerse cómo afectan los defectos del nanotubo a la sensibilidad de este tipo de dispositivos.

2.2.3 Sensores térmicos

Se utilizan para medir la **temperatura** o los cambios que se producen en ésta.

Los nanotubos de carbono pueden ser utilizados como sensores térmicos gracias a que su **resistencia** cambia con la temperatura. De hecho la resistencia aumenta prácticamente de forma lineal con la temperatura debido a que el calor crea vibraciones atómicas en el nanotubo y éstas hacen que se produzcan más colisiones con los electrones, dificultando su movimiento.

Otra propiedad de los nanotubos de carbono en la que se pueden basar los sensores térmicos es que para determinadas longitudes de onda del espectro infrarrojo presentan **piezoelectricidad** (producción de electricidad cuando son calentados). Un ejemplo de estos sensores puede verse en el artículo "[Evaluation of a pyroelectric detector with a carbon multiwalled nanotube black coating in the infrared](#)".

2.2.4 Sensores electromagnéticos

Detectan la presencia de **ondas electromagnéticas**.

Los nanotubos de carbono pueden ser utilizados como sensores electromagnéticos debido a cuatro propiedades. En primer lugar, como ya se ha comentado en el apartado [2.1.5. Optoelectrónica](#), **producen corrientes eléctricas al ser iluminados** (con luz visible), lo que les hace aptos para su utilización como sensores ópticos. En segundo lugar, como se verá en el apartado [2.4. Fotónica](#), la **fotoluminiscencia** de los SWCNT hace que puedan ser utilizados como sensores de ciertas radiaciones cuyas longitudes de onda desencadenan el fenómeno. En tercer lugar, en el apartado sobre Fotónica ya mencionado se comenta que los nanotubos de carbono también pueden comportarse como **absorbentes** de radiación visible e infrarroja y esto también puede utilizarse como base para el desarrollo de sensores. Por último, la **emisión de campo** inducida por microondas que se describe en el artículo "[Photon-stimulated field emission from semiconducting \(10,0\) and metallic \(5,5\) carbon nanotubes](#)" puede servir para la fabricación de nuevos sensores para este tipo de radiación electromagnética, además de ser la base de los amplificadores de microondas como se vio en el apartado [4.2.6. Amplificadores de microondas](#).

2.2.5 Sensores de emisión de campo

Hemos llamado así a sensores que aprovechan la capacidad de los nanotubos de carbono de emitir electrones, la cual ya ha sido comentada en el apartado [2.1.2. Emisión de campo](#).

Así en el artículo "[Application of carbon nanotube field emission effect to an ionization](#)" puede leerse cómo el hecho de que la corriente de electrones emitida por los nanotubos de carbono varíe con la **presión** de la cámara en la que se produce la emisión puede ser aprovechado para desarrollar sensores de presión.

2.3 Instrumentación científica

Los nanotubos de carbono pueden ser utilizados para mejorar las prestaciones de ciertos instrumentos científicos. En concreto pueden utilizarse como puntas de las sondas de **microscopios de sonda de barrido** y como abertura por la que circulan las partículas en suspensión de un **contador coulter**. En cada caso se aprovechan las propiedades de los nanotubos de carbono expuestas en la tabla siguiente:

<i>Propiedad</i>	<i>Aplicación</i>
Estrechos, largos, resistentes mecánicamente, poco reactivos sin funcionalizar, funcionalizables para mejorar interacciones.	Microscopios de sonda de barrido.
Pequeño diámetro.	Contadores Coulter.

2.3.1 Microscopios de sonda de barrido (SPM)

Los microscopios de sonda de barrido (**SPM – Scanning Probe Microscope**) utilizan una sonda que rastrea físicamente la muestra que se pretende estudiar. La sonda se mueve mecánicamente y recorre toda la muestra detectando cierta **interacción** que se produce entre ambas en cada posición, lo que permitirá la construcción de una imagen topográfica de ésta. Tienen resolución nanométrica, trabajan en condiciones normales de presión y temperatura y, frente a otros tipos de microscopios no requieren apenas preparación de la muestra.

Una parte fundamental de los microscopios de sonda de barrido es la **punta** de la sonda. Esta tiene que cumplir tres características fundamentales: 1º ser de **anchura nanométrica**, ya que esta dimensión determina la resolución; 2º tener la **longitud suficiente** como para poder rastrear desniveles y orificios profundos; 3º ser suficientemente **resistentes** como para no ser dañadas en la interacción que se produce con la muestra. Aunque se construyen puntas de sonda que cumplen las dos primeras condiciones, normalmente fallan en la tercera y tienen períodos de vida útil muy cortos. Los nanotubos de carbono son una alternativa eficaz para la construcción de estas puntas de sonda, por su radio nanométrico, su longitud y por su flexibilidad y elasticidad que les permiten soportar las interacciones con la muestra sin sufrir cambios en su estructura.

La interacción que se produce entre punta y muestra puede ser o bien una **fuerza por contacto** o bien **otros tipos de interacción**. Los nanotubos de carbono como puntas también son ventajosos desde este punto de vista debido a dos circunstancias: en primer lugar permiten la funcionalización de sus extremos con diversas sustancias, lo que puede mejorar la interacción con la muestra cuando no hay contacto; en segundo

lugar, reaccionan poco con la muestra cuando no están funcionalizados, lo que es una ventaja cuando punta y muestra están en contacto, frente a sustancias más reactivas que se usan en puntas y que pueden llegar a alterar la muestra al rastrearla.

En el artículo "[Recent advances in scanning probe microscope](#)" se comentan diferentes contribuciones de los nanotubos de carbono al avance de los SPM.

Los tipos de SPM detectados en nuestras búsquedas como posibles aplicaciones de los nanotubos de carbono son los siguientes:

- **Microscopio de fuerza atómica (AFM – Atomic Force Microscope)**. Tiene resolución de fracciones de Angstrom. Su sonda está formada por un cantilever microscópico con una fina punta en su extremo encargada de rastrear la muestra. Puede trabajar en modo "**contacto**" y en modo "**sin contacto**". En el primer caso la punta toca la muestra y ésta ejerce una fuerza sobre la primera a medida que la sonda se desplaza sobre la muestra en el plano XY. Para mantener la fuerza constante se produce una realimentación sobre la muestra que se mueve en la dirección Z y este movimiento proporciona una imagen topográfica de la muestra. En el modo "sin contacto" el cantilever oscila a una frecuencia próxima a la resonancia y son las **interacciones electrostáticas** entre punta y muestra las que modifican la oscilación del cantilever (en frecuencia, amplitud o fase). También en este caso se pretende mantener fija la oscilación y para ello se mueve la muestra en el plano Z obteniendo con la información del desplazamiento una imagen topográfica. En ambos casos la información sobre el movimiento del cantilever se detecta mediante un haz láser que se refleja en él y es recogido por unos fotodiodos. Se puede usar un nanotubo de carbono como punta de sonda en este tipo de microscopios, con las ventajas ya comentadas, en general, para todos los SPM. En el artículo "[Carbon nanotube atomic force microscopy tips: Direct growth by chemical vapor deposition and application to high-resolution imaging](#)" se comentan las mejoras que pueden introducir nanotubos de carbono en los AFM.
- **Microscopio de fuerza magnética (MFM – Magnetic Force Microscope)**. Su estructura y funcionamiento es similar al del AFM trabajando en modo "**sin contacto**" pero en este caso la interacción que se produce entre muestra y punta es de tipo **magnético**. Para ello ambas tienen que estar fabricadas con materiales magnéticos. En algunos textos se les considera como un tipo de AFM (generalizando este concepto a otros tipos de interacción muestra-punta distintas a las fuerzas de contacto y electrostáticas) y en otros como un sistema diferente de microscopía. Los nanotubos de carbono **recubiertos de un metal magnético** totalmente o simplemente en el extremo más próximo a la muestra pueden usarse como puntas para estos microscopios. Las ventajas que presentan son las generales para todos los SPM. Puede encontrarse más información sobre este tema en el artículo "[Metal-coated carbon nanotube tips for magnetic force microscopy](#)".

También pueden usarse nanotubos de carbono que **contienen en su interior un material ferromagnético** (hierro, por ejemplo) como puntas de los MFM. Así se comenta en el artículo "[Synthesis, properties, and applications of ferromagnetic-filled carbon nanotubes](#)".

- **Microscopio óptico de barrido de campo cercano (SNOM – Scanning Near-field Optical Microscope)**. Estos microscopios rastrean la muestra mediante un haz de luz que se emite (o se recibe, según el diseño) a través de una pequeña abertura situada en el extremo de la punta de la sonda, que no es más que una pequeña fibra óptica cubierta de un metal que refleja la luz y evita pérdidas. El diámetro de la abertura y la distancia sonda-muestra tienen dimensiones similares e inferiores a la longitud de onda de la luz que se emplea. Esta distancia sonda-muestra tan pequeña es la que determina que la región de trabajo esté en lo que se denomina "campo cercano" de la fuente emisora de luz que es la punta de la sonda. En el campo cercano el patrón de difracción de la luz cambia considerablemente respecto al convencional y varía con la distancia a la fuente. Esto, junto al pequeño tamaño de la abertura, determinan la resolución de este tipo de microscopios, mucho mayor que la que se obtiene con los microscopios ópticos normales. Así un SNOM puede conseguir una resolución entre 10 y 100 nm mientras que un microscopio óptico tradicional tiene la limitación de la mitad de la longitud de onda de la luz usada, unos 200 nm en el caso de la luz visible. Sólo regiones de la muestra del tamaño de la abertura son iluminadas cada vez y la imagen global se construye uniendo los datos de todos los puntos a medida que la sonda se mueve sobre la muestra.

Normalmente estos microscopios incorporan un **dispositivo similar a los AFM**, de forma que la punta de la sonda está montada sobre un dispositivo que vibra a una frecuencia próxima a la de resonancia y la interacción con la muestra hace que se produzcan cambios en su movimiento de vibración, lo que, igual que en los AFM, proporciona una imagen topográfica de la muestra que se suma a la óptica obtenida por el método ya descrito. El problema es que las fibras ópticas recubiertas de metal utilizadas normalmente como puntas de sonda tienen diámetros del orden de los 300 nm y esto produce malas resoluciones topográficas. El artículo "[Application of carbon nanotubes to topographical resolution enhancement of tapered fiber scanning near field optical microscopy probes](#)" propone añadir nanotubos de carbono en las puntas para mejorar así la resolución topográfica gracias a su reducido diámetro. Se añaden así al SNOM todas las ventajas ya comentadas para los SPM.

2.3.2 Contadores Coulter

Un Contador Coulter es un instrumento científico que se utiliza para **contar** y **medir** partículas.

Básicamente consta de dos electrodos que se encuentran sumergidos en una disolución de un electrolito débil en dos cubetas separadas por una pequeña abertura. Las partículas que se quieren medir y contar se encuentran en suspensión en la disolución de una de las cubetas, de forma que se produce un flujo de partículas en suspensión entre las cubetas a través de la abertura. El tamaño de la abertura debe ser tal que las partículas sólo puedan pasar de una en una. Si se aplica una diferencia de potencial a los electrodos se crea una corriente a través del electrolito y, por tanto, de la abertura. Las partículas en suspensión, que no son conductoras, producen cambios en la impedancia de la abertura al pasar por ella. Estos cambios se pueden detectar y contar así las partículas. Con una medida adecuada de los mismos obtendremos, además, información sobre la medida de las partículas ya que existe una estrecha relación entre la impedancia de la abertura y el tamaño de la partícula que la hace variar.

Un único nanotubo de carbono colocado en una membrana impermeable puede usarse como canal a través del cual pasan las partículas. Se aprovecha así el reducido tamaño de su diámetro para conseguir una abertura de dimensiones muy pequeñas y poder así contar y medir partículas de dimensiones similares.

Puede leerse un breve resumen del contador coulter desarrollado por la [Universidad de Texas](#) en el año 2000 usando un único nanotubo de carbono.

También el artículo "[A carbon nanotube-based coulter nanoparticle counter](#)" trata sobre el mismo tema.

2.4 Fotónica

Mientras la electrónica funciona con corrientes de electrones, la fotónica es la ciencia y la tecnología encargadas de generar y procesar corrientes de fotones, principalmente en el espectro **visible** y en el **infrarrojo** cercano. Aunque estrictamente la palabra luz hace referencia sólo a la radiación visible por el ojo humano, extenderemos el concepto en este apartado de forma que cuando hablemos de luz nos referiremos tanto a radiación visible como a infrarrojo cercano.

También la fotónica mira hacia los nanotubos de carbono en busca de nuevas opciones para la fabricación de dispositivos mejorados que le permitan, no sólo mejores resultados, sino también independizarse de la electrónica a la que tiene que recurrir en algunas ocasiones para realizar acciones que no puede llevar a cabo por sí misma.

Las principales propiedades ópticas de los nanotubos de carbono en las que se basarán nuevas aplicaciones fotónicas son:

- Presentan fotoluminiscencia.
- Son absorbentes saturables de luz.

La **fotoluminiscencia** (emisión de luz como consecuencia de la absorción previa de ciertas radiaciones) es una técnica ampliamente utilizada para investigar la estructura electrónica de los nanotubos de carbono. Pero, además, se ha podido observar que, en contra de lo que ocurre con otras moléculas individuales, en el caso de los SWCNT, la fotoluminiscencia no presenta fluctuaciones ni cambios bruscos de intensidad ni de espectro a temperatura ambiente (unos 300K). Gracias a esto, se ha comprobado que los SWCNTs tienen un enorme potencial para ser utilizados como fuentes luminosas de enorme utilidad para dispositivos fotónicos.

Por otro lado, los nanotubos de carbono son **absorbentes saturables** de luz. Esto significa que, cuando la intensidad de la luz incidente supera cierto umbral, su absorción óptica decrece a medida que aumenta la intensidad de la luz que los ilumina de forma que se vuelven transparentes cuando dicha intensidad es suficientemente grande. La eficiencia del efecto de absorción saturable depende de la longitud de onda de la luz incidente. El espectro para el cual los nanotubos de carbono se comportan como absorbentes saturables depende del diámetro del nanotubo. Por ejemplo, se ha probado experimentalmente la absorción saturable de SWCNTs en el infrarrojo cercano (~1550 nm), que es la zona del espectro que se utiliza normalmente para las comunicaciones ópticas.

El uso de los nanotubos de carbono como absorbentes saturables presenta ciertas ventajas frente a otras tecnologías ya existentes, que utilizan semiconductores y requieren complicados procesos de producción. Entre ellas se pueden citar las siguientes: gran resistencia al daño, potencial bajo costo, dimensiones nanométricas y forma compacta y fácil de integrar.

El hecho de que los nanotubos de carbono sean absorbentes saturables los hace ideales para ciertas aplicaciones fotónicas ultrarrápidas, como pueden ser:

- **Filtros pasa alto para la luz.** Sólo transmitirán (o reflejarán si son espejos) las ondas con intensidades altas, absorbiendo el resto.
- **Espejos absorbentes saturables para bloqueadores de modo pasivos en emisores de pulsos láser.** Si uno de los espejos de los extremos de la cavidad óptica donde se genera un haz de pulsos láser es un absorbente saturable conseguirá hacer los pulsos más estrechos, al eliminar señales laterales de menor intensidad, además de evitar que se formen pulsos secundarios de poca potencia. El artículo "[Laser mode locking using a saturable absorber incorporating carbon nanotubes](#)" trata sobre este tema.
- **Supresores de ruido.** El ruido presente en una comunicación óptica puede ser eliminado con un absorbente saturable ya que, normalmente, es una señal de baja intensidad.
- **Interruptores.** Dejarán pasar la luz o la absorberán (estados on/off) según la intensidad de una luz de control que podrá ser la propia luz que se pretende conmutar o bien una señal externa.

Los dispositivos fotónicos son muy importantes ya que sería ideal poder tener sistemas totalmente ópticos sin tener que transformar señales luminosas en electrónicas para operar sobre ellas. Actualmente en telecomunicaciones, aunque en muchos casos se usa la transmisión óptica, lo que hay en ambos extremos es electrónica. Si ésta se pudiera sustituir total o parcialmente por fotónica aumentarían las posibilidades de las comunicaciones al aprovechar así mejor el potencial que tiene la luz como onda transportadora de gran cantidad de información a enormes velocidades.

En el artículo "[Carbon nanotube-polymer composites for photonic devices](#)" puede leerse cómo pueden desarrollarse dispositivos fotónicos mediante compuestos poliméricos que incorporan nanotubos de carbono y que, por tanto, aprovechan sus propiedades.

2.5 Materiales

Los nanotubos de carbono pueden ser la base para la formación de nuevos materiales. Y pueden hacerlo de dos formas: o bien agrupándose para formar haces o bien mezclándose con otros materiales para formar compuestos (también se pueden llamar “nanocompuestos” por formar parte de su composición al menos un material con alguna dimensión nanométrica).

En el caso de los **haces** el resultado será una **fibra** con diámetro nanoscópico y longitud mucho mayor que el radio. Así, mientras los nanotubos de carbono individuales son preferidos para ciertas aplicaciones como la electrónica molecular los haces son mejores para aplicaciones estructurales, o bien aislados o bien formando parte de compuestos. Los nanotubos se mantienen unidos en los haces mediante fuerzas de Van der Waals y se ha comprobado que su estabilidad es mayor si el conjunto se retuerce que si el haz está formado por nanotubos rectos.

En el caso de la formación de **compuestos** al mezclar nanotubos de carbono con otras sustancias, en la literatura se habla de:

- Materiales con **cero dimensiones**: sus tres dimensiones son nanoscópicas. Son las **nanopartículas**, o “quantum dots”, entre las que se pueden citar, por ejemplo, los **nanopolvos** mencionados en el artículo “[Double-walled carbon nanotubes in composite powders](#)”. Estas nanopartículas pueden tener aplicaciones individuales o bien ser la base para la formación de nuevos nanocompuestos.
- Materiales de **una dimensión**: dos de sus dimensiones son nanoscópicas. Son compuestos unidimensionales las **fibras** que posteriormente pueden hilarse y dar lugar a **cuerdas** e **hilos**, pudiendo utilizarse estos últimos para confeccionar **tejidos**; también pueden mezclarse con otros materiales para formar nuevos nanocompuestos. Otros compuestos unidimensionales, pero esta vez con aplicaciones básicamente estructurales, serían las **vigas**.
- Materiales de **dos dimensiones**: sólo una dimensión es nanoscópica. Estarían en este grupo las **películas** y los **recubrimientos**, incluidas las **pinturas**, todos ellos de espesor nanométrico y con propiedades diversas, como se expondrá a continuación.
- Materiales con sus **tres dimensiones** macroscópicas.

El “número de dimensiones” que tiene un material es un factor muy importante que influye de forma decisiva en sus propiedades. Por ejemplo, los electrones se desplazan de forma diferente en un material de 1 dimensión que en otro de 2 ó 3 dimensiones. Es por este motivo por lo que hay líneas de investigación abiertas para materiales de

distinto número de dimensiones, como se ha detectado en las búsquedas realizadas para la elaboración de este informe.

Los **compuestos** que incorporan nanotubos de carbono en su composición tienen interesantes **propiedades** debido a que los nanotubos de carbono les transfieren en cierta medida sus extraordinarias características. Así, pueden desarrollarse compuestos que tengan las siguientes propiedades:

Mecánicas. Los nanotubos de carbono poseen excelentes propiedades mecánicas: alta dureza, tenacidad, resistencia mecánica, flexibilidad y elasticidad, aunque hay que aplicar grandes fuerzas para deformarlos. Son, además muy ligeros. Los nuevos materiales compuestos que incorporan nanotubos de carbono pueden exhibir una o varias de estas características, siendo así aptos para aplicaciones muy específicas como las aeroespaciales.

Así, por ejemplo, la empresa Carbon Nanotechnologies, Inc. ha patentado (Pat: “Composite of single-wall carbon nanotubes and aromatic polyamide and process for making the same”) un material compuesto a base de poliamida aromática y nanotubos de carbono de pared simple, que puede ser usada en aplicaciones que requieran una elevada resistencia mecánica.

Otros materiales compuestos de fibras de carbono ya se usan en muchas aplicaciones estructurales ligeras, pero presentan ciertos inconvenientes. Entre otros, tienen poca resistencia al impacto. Se cree que el accidente del Columbia fue causado por el impacto que sufrió el sistema externo de protección térmica, fabricado con material compuesto reforzado con carbono. Es de esperar que este problema se solucione con el empleo de nanotubos de carbono en lugar de las fibras mencionadas. La patente: “Impact resistant, thin ply composite structures and method of manufacturing same”, trata sobre este tema.

Eléctricas. En el apartado 2.1. Electrónica se han comentado las propiedades eléctricas de los nanotubos de carbono. Por ejemplo, los nanotubos metálicos son capaces de conducir la corriente eléctrica cientos de veces más eficazmente que los cables de cobre tradicionales. Otros nanotubos de carbono son semiconductores por lo que se piensa en ellos como posibles sustitutos del silicio en la electrónica del futuro. Además, los nanotubos son emisores de campo, tienen propiedades optoelectrónicas, etc.

Al formar compuestos agregando pequeñas cantidades de nanotubos a otros materiales, como polímeros por ejemplo, cambian las propiedades eléctricas de estos dando lugar a diversas aplicaciones industriales. Es interesante señalar, además, que añadiendo una cantidad insignificante de nanotubos se pueden mejorar las propiedades eléctricas del material en varios órdenes de magnitud sin aumentar apenas el peso del material.

Los materiales compuestos de nanotubos de carbono se pueden utilizar para construir electrodos utilizando eficazmente la gran área superficial específica del nanotubo y su elevada conductividad. (Pat: "[Application of carbon nanotube as electrode material of super capacitor](#)" – Instituto de Química orgánica de Chengdu).

Además de electrodos, entre otras aplicaciones que aprovechan las propiedades eléctricas de los compuestos de nanotubos de carbono pueden citarse las pilas, celdas de almacenamiento de energía, sensores, condensadores, diodos emisores de luz y pantallas electrocrómicas. (Pat: "[Carbon nanotube material useful in manufacturing composite material, electronic applications, mechanical applications, comprises microparticulate carbide or oxide material](#)" – Boston College).

La Universidad de California (Pat: "[Ceramic materials reinforced with single-wall carbon nanotubes as electrical conductors](#)" y "[Thermoelectric applications of composites of ceramics and carbon nanotubes](#)") trabaja en la obtención de un material compuesto basado en la dispersión de nanotubos de carbono de pared simple (SWCNT) en una matriz cerámica. El resultado es un material con elevada resistencia a la fractura, resistente a elevadas temperaturas y con una inusual conductividad eléctrica muy elevada, lo que le hace apto para ser utilizado en condiciones extremas.

Electrorreológicas. Los fluidos electrorreológicos experimentan cambios en su viscosidad cuando son sometidos a campos eléctricos externos. Esta interesante propiedad puede ser utilizada para el desarrollo de actuadores que transmiten fuerzas tangenciales ejercidas sobre el fluido a otra zona del mismo.

Los nanotubos de carbono pueden formar parte de compuestos con propiedades electrorreológicas. Un ejemplo es el compuesto que se menciona en el artículo "[Electrorheological application of polyaniline/multi-walled carbon nanotube composites](#)", formado por partículas conductoras desarrolladas a partir de MWCNT y polivinil alcohol que son dispersadas en un aceite de silicona aislante. Se comprueba experimentalmente que la viscosidad del compuesto así preparado aumenta con el campo eléctrico aplicado. Este comportamiento está originado por la interacción que se produce entre las partículas conductoras que cambia a medida que lo hace el campo eléctrico externo.

Hidrófobas. Los nanotubos de carbono son hidrófobos, es decir, repelen el agua. Esta característica puede dar lugar al desarrollo de compuestos con la misma característica, como se menciona en el artículo "[Dispersion and alignment of carbon nanotubes in polymer matrix: a review](#)".

Ignífugas. Se ha comprobado experimentalmente que los polímeros reforzados con nanotubos de carbono tienen propiedades ignífugas. El motivo no se conoce todavía muy bien pero podría ser porque al elevarse la temperatura en caso de fuego los

nanotubos se desplazarían hacia la superficie y formarían una red que, aparte de mantener la integridad estructural del polímero, formarían parte de una barrera aislante que protegería al interior del material (hay que recordar que los nanotubos de carbono conducen muy bien el calor en la dirección del eje del nanotubo, pero no transversalmente). La ventaja de los nanotubos de carbono como aditivos ignífugos es que permitiría desplazar a otros que se usan actualmente y que son perjudiciales para el medioambiente.

Los materiales compuestos con propiedades ignífugas son de vital importancia en muchos ámbitos de aplicación. Los aviones comerciales de transporte, por ejemplo, contienen gran cantidad de plásticos inflamables en la tapicería de los asientos, ventanas, marcos de ventanas, aislamientos de cables y partes variadas. Aunque estas partes no están sometidas a regulaciones en cuanto a resistencia a temperaturas, desde la FAA (Federal Aviation Administration) se está promoviendo el desarrollo de tecnología de materiales para crear una cabina totalmente ignífuga.

Ópticas. En otros apartados de este informe ([2.4. Fotónica](#), [2.1.5. Optoelectrónica](#), [2.2. Sensores](#)) se comentan ampliamente las propiedades ópticas de los nanotubos de carbono. En resumen se puede decir que producen corrientes eléctricas al ser iluminados con luz visible (y a la inversa), presentan fotoluminiscencia y son absorbentes de radiación visible e infrarroja.

Estas propiedades se transfieren a los compuestos de los que forman parte pudiendo conseguir en ellos múltiples efectos ópticos. Como ejemplo puede citarse la patente [“Production of derivatized well dispersed carbon nanotubes useful as active components in optical applications involves reacting underivatized carbon nanotube with an ionizing agent to generate anions on surface of underivatized carbon tube”](#) del Instituto Politécnico Rensselaer.

Químicas. Los nanotubos de carbono son polímeros de carbono puro, y como tales poseen la riqueza de la química del carbono. Permiten el acoplamiento de estructuras químicas tanto en sus paredes como en los extremos, lo que provoca un cambio en sus propiedades. En el caso de acoplar estructuras químicas en ambos extremos de un nanotubo metálico éste facilitaría el transporte de electrones entre ellas, lo cual abre un abanico de posibilidades para nuevas aplicaciones tecnológicas.

El hecho de poder modificar de esta forma los nanotubos de carbono permite, entre otras cosas, conseguir que sean solubles en determinados tipos de solventes lo que facilita su dispersión en una matriz para formar compuestos.

Los compuestos desarrollados a partir de nanotubos de carbono modificados químicamente exhibirán propiedades relacionadas con las nuevas características de los nanotubos.

Térmicas. Los nanotubos de carbono, además de ser muy estables a altas temperaturas, presentan una altísima conductividad térmica (superior a la del diamante) en la dirección del eje. Sin embargo, si se les aplica calor en dirección perpendicular al eje, lo reflejan.

Estas propiedades se transfieren a los compuestos que contienen nanotubos de carbono. Así, se pueden desarrollar materiales con alta conductividad térmica en una dirección pero aislantes en otra, según la alineación de los nanotubos de carbono. La primera propiedad podrá ser usada para fabricar **disipadores de calor** en ciertas aplicaciones como la electrónica donde los chips pueden alcanzar temperaturas superiores a 100 °C. La segunda servirá para elaborar estupendas **barreras térmicas**. En la patente "Thermal interface with silver-filled carbon nanotubes" la empresa Hon Hai Precisión Industry Co. Ltd. de Taiwán expone un material térmico usado como disipador de calor, mientras que la patente "Ceramic nanocomposite for thermal barrier material and coating, includes ceramic host material, and nanostructure carbon material, e.g. single-wall carbon nanotubes" trata sobre un material usado como barrera térmica.

Como ejemplos de **aplicaciones** en las que se pueden utilizar materiales que contienen nanotubos de carbono citaremos los siguientes por ser los que han surgido en las búsquedas realizadas para la elaboración de este informe:

- **Blindajes.** Son barreras físicas que se utilizan para proteger materiales, o seres vivos, contra agresiones externas diversas caracterizadas por una energía determinada que incide sobre ellos. Para ello o bien absorben la energía incidente, transformándola en otro tipo de energía, o bien la reflejan.

Se han detectado tres tipos de blindajes en los que intervienen compuestos que contienen nanotubos de carbono y que aprovechan las propiedades de éstos: electromagnéticos, acústicos (incluidos ultrasonidos) y contra impacto. Una importante contribución de los nanotubos de carbono a los blindajes es su **ligereza**, lo que hace posible la obtención de blindajes con muy buenas prestaciones y poco peso, contrastando esto con los blindajes tradicionales construidos en muchas ocasiones mediante pesadas planchas metálicas.

Los blindajes **electromagnéticos** basan su funcionamiento en que los nanotubos de carbono crean una red tridimensional conductora en el interior de la matriz del compuesto, que evita que la radiación incidente alcance el elemento que se pretende proteger.

En los blindajes **acústicos** los nanotubos de carbono dispersan la onda incidente en todas direcciones y así la matriz del compuesto la puede absorber con mayor facilidad.

En el caso de los blindajes **contra impacto**, las propiedades mecánicas de los nanotubos de carbono (dureza, tenacidad, resistencia mecánica, flexibilidad, elasticidad) les permite dotar a los compuestos de los que forman parte de una alta capacidad para absorber la energía de un impacto y transformarla en una deformación plástica. Esto permitirá, por ejemplo, la creación de nuevos materiales antibala mucho más ligeros, como se comentó antes, que los existentes actualmente.

El artículo [“Charge transport properties of composites of multiwalled carbon nanotube with metal catalyst and polymer: application to electromagnetic interference shielding”](#) trata sobre un compuesto basado en nanotubos de carbono empleado para blindaje electromagnético y en el artículo [“Carbon-nanotube-reinforced zr-based bulk metallic glass composites and their properties”](#) se puede leer información sobre nanocompuestos para blindajes acústicos.

La empresa estadounidense Carbon Nanotechnologies Inc., ha desarrollado y patentado (Pat: [“Production of composite used in ballistic protection, e.g. armor, by suspending single-wall carbon nanotubes in acid, adding aromatic polyamide, dispersing the nanotubes in the polyamide, and removing the acid”](#)), un material compuesto a base de nanotubos de carbono de pared simple y poliamida aromática. Se espera emplearlo en protección balística, incluyendo blindaje para el cuerpo y para vehículos.

- **Filtros.** Un filtro es una materia porosa que elimina los materiales que lleva en suspensión un líquido que pasa a través de él. Se han fabricado filtros mediante materiales compuestos en los que los poros son nanotubos de carbono encastrados en otro material que hace de matriz. Por el interior de los nanotubos de carbono pueden fluir tanto líquidos como gases y el tamaño nanométrico de su diámetro bloquea el paso de las partículas que se quiere eliminar.

Muchos investigadores y empresas han desarrollado ya sistemas de filtración basados en nanotubos de carbono para aire (Pat: [“Filter using carbon nanotube”](#) - Samsung Electronics Co., Ltd.), agua (Pat: [“Applied technology of carbon nanometer pipe for removing microencapsulated algae toxin in water”](#) - Centro de Investigación medioambiental Ecological de China) y virus (Pat: [“Nanotube filter for filtering fluids e.g. water has hollow or self supporting filter made of self supporting array of carbon nanotubes”](#) - Instituto Politécnico Rensselaer y Universidad de Banaras).

2.6 Biotecnología y Química

Se describen a continuación las principales aplicaciones de los nanotubos de carbono en las áreas de biotecnología y química que han sido detectadas durante la realización del presente estudio. Destacan especialmente las **aplicaciones médicas** como las más ampliamente comentadas en los registros científicos consultados. También son muy importantes los **sensores químicos** que, aunque podrían estar incluidos en este punto, se han agrupado con otros tipos de sensores en el apartado 2.2. Sensores. Por último comentar que los resultados de nuestras búsquedas que hablaban sobre **técnicas analíticas** se han agrupado con los sensores químicos ya que hacían mención a los métodos de detección utilizados en estos.

2.6.1 Adsorción y absorción

Un **adsorbente** es una sustancia que tiene gran capacidad de adsorción, es decir, de atraer y retener en su superficie moléculas o iones de otros cuerpos.

Los nanotubos de carbono tienen capacidad para adsorber ciertas sustancias. Esto, unido a su gran área superficial, los hace aptos para su uso en la filtración de líquidos y gases. En concreto sus aplicaciones en el filtrado de agua y aire hace de ellos un material prometedor para solucionar múltiples problemas medioambientales como se comenta en el artículo "Adsorption of chromium(vi) ions from water by carbon nanotubes".

La **absorción**, sin embargo, consiste en atraer y retener moléculas e iones de otros cuerpos de forma que éstos penetran en el interior del absorbente.

Los nanotubos de carbono que se rellenan con otras sustancias pueden ser absorbentes, normalmente debido a reacciones químicas que se realizan entre la sustancia contenida en el nanotubo y la que se pretende absorber. Así, por ejemplo, como se menciona en el artículo "Highly effective metal vapor absorbents based on carbon nanotubes", en el Laboratorio de Materiales Avanzados, del Instituto Nacional de Ciencia de Materiales de Japón, están estudiando cómo nanotubos de carbono que contienen galio en su interior pueden absorber vapor de cobre que se deposita en el interior del nanotubo formando una aleación con el galio (y este efecto es independiente de si el nanotubo está abierto o cerrado por sus extremos). Teniendo en cuenta que el galio tiende a formar aleaciones con metales como el mercurio y el uranio, la aplicación descrita en el artículo mencionado podría utilizarse para eliminar sustancias tóxicas o radiactivas.

Las propiedades de adsorción y absorción de los nanotubos de carbono se utilizan también para la creación de sensores químicos, tratados en el apartado 2.2. Sensores.

2.6.2 Catálisis

Un catalizador es una sustancia que acelera o retarda una reacción química pero sin sufrir ella misma ninguna alteración.

En muchos casos los catalizadores deben ir acompañados por **materiales soporte** por diversos motivos: para inmovilizar al catalizador, para aumentar la superficie de contacto del catalizador con las sustancias reactivas, para estabilizar el catalizador y prevenir aglomeraciones, y para no tener que separar el catalizador de los productos cuando concluye la reacción. Dado que los soportes de catalizadores suelen ser materiales porosos para que la catálisis se realice en su interior, los nanotubos de carbono pueden ejercer este papel. Añaden, además, otras ventajas originadas por sus propiedades únicas, destacando su resistencia y estabilidad incluso a elevadas temperaturas, y la facilidad con que se pueden funcionalizar. En la patente [“Enhanced stability of proteins immobilized on nanoparticles”](#), el Instituto Politécnico Rensselaer muestra cómo se utilizan los NTC para inmovilizar proteínas.

Además, los nanotubos de carbono pueden por sí solos ser **catalizadores**. En el artículo [“Solution redox chemistry of carbon nanotubes”](#) se describe cómo los nanotubos pueden oxidarse y reducirse con facilidad, lo cual apunta hacia su posible utilización como catalizadores en reacciones redox.

2.6.3 Electrosíntesis

El nombre “electrosíntesis” hace referencia a una reacción química que tiene lugar en una disolución provocada por la acción de una corriente eléctrica. Para ello se sumergen en la disolución unos electrodos a los que se aplica una diferencia de potencial. En la disolución hay sustancias orgánicas que se oxidarán o reducirán con los electrones suministrados en los electrodos.

En el artículo [“Electroreduction of alpha-glucose on cnt/graphite electrode modified by zn and zn-fe alloy”](#) se reflejan las investigaciones realizadas en el uso de electrodos que contienen nanotubos de carbono para la electro-reducción de alfa-glucosa con el objetivo de formar sorbitol. Se usan electrodos de Cinc con y sin nanotubos y se comprueba que el resultado es mejor cuando hay nanotubos. La conclusión que se obtiene es que los nanotubos de carbono pueden tener un potencial interesante para ser utilizados en electrosíntesis.

2.6.4 Medicina

Los nanotubos de carbono se plantean como una promesa revolucionaria en medicina.

Aunque todavía no hay aplicaciones reales, el esfuerzo investigador en esta área es muy grande dado el enorme potencial que poseen para realizar diferentes funciones. En el artículo "[Carbon nanotubes for biomedical applications](#)" puede leerse una interesante exposición de distintas aplicaciones médicas de los nanotubos de carbono. Destacamos las siguientes:

- **Liberación de fármacos:**

Medicinas encapsuladas en el interior de nanotubos de carbono podrían ser ingeridas y transportadas a través del torrente sanguíneo hasta el punto donde tienen que ser administradas. Además de conseguir así gran efectividad en los medicamentos, se evitarían los efectos secundarios presentes en la mayoría de los fármacos que tomamos actualmente, mejorando la calidad de vida de personas sometidas a agresivos tratamientos contra ciertas enfermedades como el cáncer.

Los nanotubos de carbono son sustancias adecuadas para ser portadores de fármacos porque no interaccionarían con éste, conservando por tanto su integridad, son suficientemente resistentes como para no ser alterados durante el tránsito por el interior del cuerpo y por el hecho de estar formados por carbono, sustancia básica en el cuerpo humano, es de esperar que sean totalmente biocompatibles y que pudieran descomponerse y excretarse después de liberar el fármaco. Además, hay estudios que demuestran que el reducido tamaño de los nanotubos de carbono los capacita para penetrar en el interior de las células, requisito necesario para esta aplicación.

- **Diagnóstico por imagen:**

Resonancia magnética. Sólo algunas sustancias presentes en el organismo tienen las propiedades magnéticas adecuadas para emitir las señales que proporcionan información sobre el órgano o tejido que se quiere estudiar. Entre ellas está el carbono-13, pero su concentración es insuficiente. Normalmente se suministra desde el exterior constituyendo lo que se denomina "contraste", sustancia que se administra al paciente en el momento de realizar la prueba. Los nanotubos de carbono podrían ser utilizados como portadores de carbono-13, como se detalla en la patente "[Magnetic resonance imaging \(mri\) agents: water soluble carbon-13 enriched fullerene and carbon nanotubes for use with dynamic nuclear polarization](#)".

Sistemas de vídeo miniaturizados. Los nanotubos de carbono también podrían transportar en su interior pequeños sistemas de vídeo de tamaño nanoscópico. Se podría así llegar a zonas de difícil acceso en el organismo simplemente mediante la ingestión de una píldora.

- **Prótesis:**

Andamiajes para regeneración ósea. En el artículo "[A Bone Mimic Based on the Self-Assembly of Hydroxyapatite on Chemically Functionalized Single-Walled Carbon Nanotubes](#)" se refleja el trabajo que, sobre este tema, se está llevando a

cabo en el Centro de Neurociencias de la Universidad de California. Los tejidos óseos son unos compuestos naturales de fibras de colágeno e hidroxiapatita cristalina. Se ha demostrado que los nanotubos de carbono pueden imitar el rol del colágeno como soporte para inducir el crecimiento de los cristales de hidroxiapatita. Tratando químicamente los nanotubos, sería posible atraer los iones de calcio y promover así el proceso de cristalización. Los nanotubos sustituirían a los materiales que se utilizan actualmente para este proceso aportando mayor resistencia, flexibilidad y biocompatibilidad.

Neuroprótesis visuales. El Centro Nacional de Microelectrónica del CSIC junto con la Universidad Autónoma de Barcelona y la Universidad Miguel Hernández investigan la posible sustitución de electrodos de platino por electrodos de nanotubos de carbono en prótesis visuales que estimularían las partes dañadas del cerebro encargadas de la visión. Así, aparte de la biocompatibilidad de los nanotubos, dado el pequeño tamaño de éstos podría ponerse un número mucho mayor que en el caso de los electrodos de platino usados actualmente.

Músculos artificiales. Los nanotubos de carbono presentan electrostrictividad, como se comenta en el apartado 2.8.5. NEMS. Esto los hace aptos para ser utilizados como actuadores y, por tanto, como potenciales componentes de músculos artificiales.

- **Desarrollo y prueba de nuevos medicamentos:**

La funcionalización de los nanotubos de carbono permitirá su uso en el **desarrollo** de nuevos medicamentos.

Por otro lado utilizándolos como sensores (ver apartado 2.2. Sensores) podrán emplearse en las **pruebas** y el **seguimiento** de nuevos fármacos por el interior del organismo.

- **Cirugía:**

Los nanotubos de carbono podrían utilizarse como **sensores** para desarrollar material quirúrgico inteligente. Esto podría aplicarse a instrumental existente actualmente, pero también podría pensarse en **nano-instrumental** basado en nano-robots que serían manejados desde el exterior mediante un joystick y que recorrerían el cuerpo del paciente realizando cirugía a nivel celular. También en la construcción de estos nano-robots podrían estar implicados los nanotubos de carbono.

2.7 Energía

Aunque son temas íntimamente relacionados, se ha considerado conveniente dividir este apartado en dos grandes grupos: almacenamiento y conversión de energía.

2.7.1 Almacenamiento

Una de las problemáticas que existen en los sistemas de gestión de la energía es el almacenamiento de ésta. Los sistemas al uso a día de hoy, básicamente baterías, tienen limitaciones tanto de vida de almacenamiento como de consumo energético para su recarga, resultando poco eficientes. Por otro lado en muchas aplicaciones el peso y el volumen de los sistemas de almacenamiento son parámetros de vital interés. Los nanotubos de carbono pueden aportar mejoras debido no sólo a su elevada superficie específica que puede garantizar sistemas de almacenamiento ligeros, sino que sus propiedades mecánicas los hacen más resistentes. Dentro de este apartado se tratarán los sistemas de almacenamiento de hidrógeno y otros gases, pensando en aplicaciones en pilas de combustible, además de los supercondensadores.

2.7.1.1 Hidrógeno y otros gases

La investigación sobre almacenamiento de hidrógeno está despertando mucho interés debido a que es una fuente de energía que podría sustituir a la actualmente predominante basada en combustible fósil. Con el fin de impulsar la investigación y marcar unos **objetivos a lograr a medio plazo, el Departamento de Energía americano (DoE)** ha propuesto unos objetivos a alcanzar para el almacenamiento de hidrógeno en los próximos años, que se resumen en la tabla siguiente:

	<i>Año 2010</i>	<i>Año 2015</i>
Energía específica	2 kWh/kg	3 kWh/kg
Energía por volumen	1.5 kWh/l	2,7 kWh/l
Precio de la energía	\$4 kWh	\$2 kWh

Respecto a las líneas del DoE en lo referente a las tecnologías de hidrógeno se pueden consultar los logros y los pasos a seguir en [Hydrogen posture plan](#) (2006).

A la hora de almacenar el hidrógeno se presentan varias alternativas posibles: la **presurización**, la **licuación**, la **quimisorción** (almacenamiento con existencia de enlace químico) y/o la **fisorción** (almacenamiento en el que sólo intervienen las fuerzas de Van der Waals) del material en materiales porosos. Esta última opción es la que ha despertado el interés de los CNT para ser utilizados en el almacenamiento de hidrógeno.

Los CNT se distinguen en general de otras superficies de grafito en su curvatura cerrada y en su hueco interior. En este caso los campos generados por las paredes se solapan para dar una mayor interacción con las moléculas del gas que la que se tendría en el caso de una superficie de carbono plana, y esta es la razón que hace que actualmente los CNT sean candidatos a ser utilizados para almacenamiento de gases, hidrógeno en particular.

Varios artículos tratan del uso de CNT como depósitos de hidrógeno. Un artículo reciente sobre este tema es Storage of hydrogen by physisorption on carbon and nanostructures materials (2007) en el que se comparan las propiedades como depósitos de hidrógeno del **carbón activo**, de SWNT y de **materiales metal-orgánicos (MOF)**. En general para esta aplicación se busca el material que presente una **mayor área específica por unidad de volumen**. Considera a los MOF como los más aptos, seguidos por los SWNT. Si bien introduce el comentario pesimista de que en la actualidad no se está en condiciones de llegar a las propuestas del DoE y comenta como próximas líneas de investigación: la optimización estructural de los materiales y la investigación del efecto de dopantes sobre los materiales.

Sobre el almacenamiento en MOF puede resultar interesante la siguiente noticia.

Finalmente el artículo Carbide-Derived carbons: effect of pore size on Hydrogen uptake and heat of adsorption (2006) introduce un nuevo tipo de material, los **carbide-derived carbons (CDC)**, que parecen ofrecer mejores prestaciones que los comentados en el artículo anterior.

En general de todo lo anterior se desprende que el uso de CNT en aplicaciones de almacenamiento de hidrógeno puede ser un paso intermedio, pero no parece ser un paso definitivo ya que **aparecen otros materiales con, a priori, mejores prestaciones**.

A pesar de estas sensaciones, la empresa **Nanergy** pretende tener desarrollado en 2-3 años un sistema de almacenamiento de hidrógeno basado en nanotubos de carbono.

2.7.1.2 Supercondensadores

El **supercondensador** (o **supercapacitor**) representa una evolución en las prestaciones de los condensadores habituales.

Un condensador (o capacitor) es un dispositivo formado por **dos placas** conductoras, también conocidas como armaduras, **separadas por un material dieléctrico** (aislante). Dispuesto en un circuito eléctrico al someterlo a una diferencia de potencial este dispositivo **almacena carga** (y por tanto energía) en las armaduras.

Esta propiedad de almacenamiento de carga se denomina capacitancia. Los procesos que llevan a este almacenamiento son puramente electrostáticos por lo que son **procesos muy rápidos y repetitivos**.

Los condensadores tienen en general **poca capacidad de almacenamiento** y su característica (y aplicación) principal es el suministro de una elevada potencia puntual que puede ser requerida en un momento muy concreto del funcionamiento de un dispositivo, un flash por ejemplo. Se puede decir, por tanto, que los condensadores son **más acumuladores de potencia que de energía**.

La comprensión de los procesos físicos que ocurren en la superficie de los materiales y la tecnología actual que permite generar materiales con una gran área interna ha llevado a una mejora en las prestaciones de los condensadores.

Un supercondensador es un condensador que tiene una alta capacidad para almacenamiento de carga. La diferencia entre condensador y supercondensador se halla en el tipo de material que se utiliza en las armaduras. En supercondensadores se utiliza un **material de muy alta porosidad** y por tanto se dispone de **más espacio para almacenar carga**. De esta manera se obtienen prestaciones que los hace **posibles sustitutos de las baterías actuales** o sus complementarios en algunas aplicaciones. En general consisten en dos electrodos de material electroactivo unidos a cada una de las placas del condensador, separados por una membrana y sumergidos en un electrolito.

En la actualidad se **están desarrollando con carbón** activo debido a la alta porosidad que presenta este material. **La utilización de CNT en esta aplicación permite cambiar el material poroso e irregular del carbón activo** por una estructura de CNT alineados de pocos nanómetros de diámetro cada uno, con lo que se aumenta la capacidad de carga al tener **mayor superficie específica**.

Los supercondensadores, en general, presentan las ventajas de tener un **gran rendimiento**, una **alta energía específica** (4 kWh/kg) y una **muy elevada potencia específica** (5 kW/kg), además de un **tiempo de carga corto**. Además, al ser procesos que no dependen de reacciones químicas **no presentan efecto memoria**, pudiendo ser cargados y descargados un gran número de veces.

El artículo [Activated carbon-carbon nanotube composite porous film for supercapacitor applications](#) realizado por el CNRS en 2005 presenta estudios sobre el uso de compuestos CNT-carbono activo para ser utilizados como supercapacitores.

En el análisis de los artículos hallados en torno a este tema, se puede destacar [Carbon nanotube felt composite electrodes without polymers binders](#), de la Universidad de Sao Paulo en Brasil, publicado en el 2006. En el se pretende eliminar el material 'ligante' que suele utilizarse en la preparación de electrodos para agregar los materiales activos

del electrodo. La presencia de este 'ligante' conlleva por un lado una reducción del área efectiva de material activo y por otro puede tener efecto también en su estabilidad térmica ya que normalmente presenta una estabilidad térmica menor que la del material activo. Para llevar a cabo esta eliminación este equipo ha crecido CNT sobre un material multicapa (*feltro*) de carbono, y definen el conglomerado como una red tridimensional de fibras de carbono con excelentes propiedades eléctricas y mecánicas. En este caso los CNT que se utilizaron son del tipo 'bamboo' y 'cup-staked' aunque en futuros trabajos piensan utilizar SWNTy MWNT.

En la siguiente noticia se puede ver el uso que un equipo del MIT piensa dar a los CNT en los condensadores ([Noticia](#)). Se trata de cubrir los electrodos con CNT para aumentar la superficie que es proporcional a la capacidad de carga. Dispositivos utilizando esta tecnología se espera que **puedan estar en el mercado en un período de cinco años.**

2.7.2 Conversión

Sean cuáles sean las fuentes de energía de las que se parte es necesario generar un sistema que convierta la energía de la fuente en energía útil. Las formas de entrega de energía de las fuentes de partida pueden ser muy variadas, un material almacenado, como el hidrógeno del apartado anterior, una reacción química, la radiación solar, etc.

También aquí los nanotubos se muestran como buenos aliados tecnológicos. Se comentan a continuación aplicaciones a algunas tecnologías en las que aportan mejoras de eficiencia, en concreto, pilas de combustible, baterías de ión litio y células solares.

2.7.2.1 Pilas de combustible

Una célula o pila de combustible tiene un funcionamiento electroquímico **similar a una pila** pero con la diferencia de que los elementos que inician la reacción para liberar energía (**reactivos**) **se reabastecen en todo momento de manera que no tiene una vida limitada** como en el caso de las pilas convencionales.

En el caso más habitual se tiene hidrógeno (pila de hidrógeno) que entra por el ánodo disociándose en protones y electrones. Por el cátodo entra oxígeno. Ambos, ánodo y cátodo, están separados por una membrana que sólo permite el paso de los protones de manera que los electrones son forzados a circular por el circuito eléctrico, generando electricidad. De vuelta a la pila los electrones entran por el cátodo encontrándose de nuevo con los protones y con el oxígeno entrante formando agua, que es el único producto de esta pila.

Uno de los elementos esenciales para el buen funcionamiento de la pila es el electrocatalizador, normalmente un material precioso como el platino o el rutenio y, por tanto caro. Éste debe estar en el electrodo que debe tener como características: ser un **material poroso, de elevada superficie específica, inerte y buen conductor**. Los CNT **cumplen con todas estas características** y, por tanto son candidatos a ser utilizados.

Un resumen del estado del arte en esta aplicación se puede ver en [Progress in the synthesis of carbon nanotube- and nanofiber-supported Pt electrocatalysts for PEM fuel cell catalysis](#), publicado en el 2006 por el National Research Council y la University of British Columbia, ambos canadienses. El artículo hace un repaso a todas las técnicas que posibilitan la generación de electrodos Pt/CNT.

También se pueden utilizar los **MWNT para generar un sensor que controle la cantidad justa de metanol** en una pila de combustible como se muestra en [Carbon nanotubes based methanol sensor for fuel cells application](#) un artículo desarrollado en colaboración entre la Universidad Nacional de Seúl y la Universidad de Texas en 2006.

2.7.2.2 Baterías de ión Litio

Actualmente multitud de pequeños dispositivos electrónicos: teléfonos móviles, agendas electrónicas, ordenadores portátiles, etc. funcionan con este tipo de baterías. El Litio es un material interesante ya que es el elemento que tiene un mayor potencial electroquímico, lo que indica que, teóricamente, es el mejor candidato para almacenar energía.

En las baterías de ión Litio básicamente lo que se produce es el **tránsito**, en función de un potencial externo aplicado, **de iones Li entre el cátodo** (normalmente de LiCO_2) y **el ánodo de carbono** (y a la inversa cuando se carga). La **aplicación de los CNT** en este caso, se produce **en el ánodo de la pila**, debido a su **elevada superficie específica** que permite aumentar la reacción con el electrolito y a su **elevada conductividad**. El ánodo se puede construir únicamente con CNT pero **lo habitual es usar los CNT como aditivos en grafito**. Se han realizado estudios con diferentes valores de % en peso de CNT y se obtiene una correlación entre el aumento del % y la mejora de la eficiencia de la batería en función del número de ciclos de carga. En el artículo *'Applications of carbon nanotubes in the twenty-first century'* (2004, M. Endo y otros), se muestra una eficiencia del 100% de la batería tras 50 ciclos de carga con un % en peso de nanotubos del 10%.

Según se piensa las mejoras que introducen los nanotubos en esta aplicación son debidas a la mayor superficie de contacto que ofrecen los nanotubos con el electrolito y al aumento de la conductividad que ofrece la presencia de los nanotubos en el ánodo. Se muestran además **otras ventajas** como una **mayor vida de la pila** y unos **electrodos mecánicamente más robustos**.

También otro tipo de pilas como las de plomo-ácido se pueden aprovechar de electrodos reforzados con CNT.

En la literatura se han hallado varias aplicaciones de CNT para esta aplicación. Por ejemplo en [Electrochemically functionalized carbon nanotubes and their application to rechargeable lithium batteries](#), (2006, m. Baibarac y otros) se comenta la utilización composites de CNT (tanto SWNT como MWNT) funcionalizados con PVC para ser utilizados en electrodos de pilas ión Li.

2.7.2.3 Células solares

Las células solares son placas que **aprovechan el efecto fotoeléctrico** para convertir la radiación óptica que incide sobre ellos en corriente eléctrica continua. Básicamente lo que ocurre es que al incidir un fotón sobre un diodo semiconductor hay electrones que absorben esa energía de manera que son capaces de superar la banda de energía prohibida del material generando electrones libres y, por tanto, una corriente eléctrica.

El problema que tienen las células solares **en la actualidad es que su eficiencia no es muy elevada**, además de ser muy dependientes del material, en concreto del silicio y, por tanto, muy dependientes del precio de éste.

La participación de los **CNT puede ser doble**. En una primera solución los CNT pueden ser el material (o un componente del material compuesto) **semiconductor** que genera corriente al ser excitados por rayos de luz de la longitud de onda apropiada para superar la estructura de bandas que presentan, tal y como sucede con un material semiconductor normal y corriente. Una segunda aplicación es la de mejorar y **facilitar el tránsito de las cargas fotogeneradas** hasta la superficie del electrodo aprovechando su alta conductividad.

En la línea de material compuesto semiconductor conteniendo nanotubos están los Polímero orgánicos conductores (COP) de los que se pueden consultar algunos de los últimos estudios en aplicaciones en células solares en el artículo [Nanocomposites based on conducting polymers and carbon nanotubes: from Nancy materials to functional applications](#) del Instituto de de Ciencia de materiales de Barcelona del CSIC.

Desde hace algunos años se está investigando un nuevo tipo de célula solar basada en la fotosíntesis y, por tanto, en la activación de reacciones químicas mediante la luz. En esta línea también se ha hallado el artículo [Supramolecular assemblies of different carbon nanotubes for photoconversion processes](#), de la Universidad de Erlangen, en el que **se utiliza a los CNT como componente captador de electrones (ánodo)**. De hecho en este artículo se utiliza de base la célula solar fotoelectroquímica para comparar el comportamiento de diferentes tipos de CNT (SWNT, DWNT, MWNT normales y MWNT finos) encontrando que los más adecuados para esta aplicación parecen ser los MWNT finos.

2.8 Mecánica

Una de las primeras propiedades que destacaron tras el descubrimiento de los nanotubos de carbono fueron sus propiedades mecánicas: **Un módulo de Young del orden de 1 TPa, una resistencia a la tracción en torno a los 50 GPa y una elongación del 10%**. Estas propiedades son superiores a las de cualquier material conocido y ya desde el inicio marcaron una línea de investigación para ver como poder sacarles partido. La tendencia normal ha sido dispersar los nanotubos en matrices de otros materiales con el fin de transferir parte de las prestaciones mecánicas de los nanotubos a los materiales.

A continuación se van a describir algunas de las aplicaciones que pueden aprovechar estas características mecánicas de los CNT.

2.8.1 Actuadores

Se denomina actuador a cualquier **sistema mecánico capaz de realizar una acción sobre su entorno**. Dado que para que esta acción sea útil ha de poder ser controlable en ingeniería se denomina actuador al sistema que realiza dicha modificación de su entorno en función de una señal de entrada (en la mayoría de los casos eléctrica) de manera que a menor/mayor señal se tenga una menor/mayor respuesta.

Es evidente que para que un actuador pueda realizar una función concreta ha de poder generar la fuerza apropiada para dicha aplicación dentro de las especificaciones de peso y volumen que requiera la aplicación, evitando en lo posible sistemas que requieran elevados potenciales y/o corrientes de trabajo y asegurando que su rango de trabajo es adecuado para todas las situaciones de la aplicación. La mayoría de los materiales que se están utilizando para actuación tienen alguna de las limitaciones anteriores. Una de las líneas de investigación más interesante sobre nuevos materiales para actuadores la centran los CNT debido a las extraordinarias propiedades mecánicas que muestran. **En la mayoría de los casos los CNT vienen dispersos en composites.**

Además de las mecánicas es evidente que **en la aplicación como actuadores se podrá sacar beneficio de otras propiedades** de los nanotubos:

- **Conductividad eléctrica.** Su elevado valor puede permitir intensidades de corriente elevadas y contactos muy fiables con muy poca resistencia.
- **Piezorresistencia.** Al estirar o contraer un nanotubo metálico se comprueba que se modifica su conductividad. Esto de hecho parece una aplicación directa para sensores, pero está claro que en muchos de los casos los sensores han de ser una parte integrante de los actuadores.

- **Efecto electroquímico.** Al introducir carga en exceso en un CNT los enlaces de los átomos de C tienden a alargarse produciendo una elongación y, por tanto, una fuerza.

La aplicación de CNT llevará a actuadores mejores y con mejor estabilidad térmica que podrán además actuar en ambientes donde hasta ahora los materiales no eran suficientemente estables.

La sensación, de todas formas, es que aún queda bastante camino por recorrer antes de tener actuadores basados en CNT completamente operativos.

Se puede profundizar sobre todo lo comentado en el artículo [Introduction to carbon nanotube and nanofiber smart materials](#), realizado en colaboración entre la Universidad de Cincinnati, el Instituto coreano de maquinaria y materiales de Corea del Sur y el Air Force Institute of Technology Americano, publicado en el 2006.

2.8.2 Amortiguadores

Las estructuras mecánicas en general están sometidas, ya sea debido propiamente a su uso o a imprevistos externos, a **solicitaciones vibratorias**; algunas son pequeñas y no parecen de gran importancia para la estabilidad de las estructuras pero hay algunas que pueden poner en peligro la estabilidad de la estructura o la funcionalidad para la que se ha construido. El peligro puede venir tanto por la intensidad de la perturbación como por la frecuencia de la misma pudiendo llevarla a entrar en resonancia, como por la repetición de la misma **pudiendo llevar a la aparición del fenómeno de la fatiga** y por tanto a una limitación de su vida útil. Tener sistemas que permitan amortiguar estas solicitaciones puede ser vital para muchas aplicaciones.

Actualmente ya se está trabajando con materiales electro y magnetorreológicos, piezoeléctricos, etc. que si bien son un buena solución parcial presentan algunas limitaciones como pueden ser la **estabilidad térmica** o su peso.

El mecanismo de la amortiguación parece estar relacionado, en la escala micro y nanométrica, con la disipación de energía por medio de fricción, por lo que combinación de **una gran área de contacto, baja densidad y elevada estabilidad térmica** (hasta los 600 °C) típicas de los **CNT los hace buenos candidatos** para esta aplicación. En la mayoría de las aplicaciones se utilizan encastrados en polímeros.

En cuanto a la elección del tipo de CNT a utilizar **SWNT o MWNT parece ser que los primeros dan mejores prestaciones** debido a que las capas interiores de los MWNT parecen no colaborar en la disipación de energía. Para profundizar sobre la diferencia entre ambos tipos de CNT en esta aplicación resulta interesante el

artículo [Comparing Damping Properties of Singlewalled and Multiwalled Carbon nanotubo polymer composites](#), del Rensselaer Polytechnic Institute americano, publicado en el 2005.

2.8.3 Dispositivos para fluidos

Debido a la **alta hidrofobicidad** documentada que presentan los nanotubos de carbono parece razonable pensar que no pueden ser buenos conductores de agua y de fluidos en general. Sin embargo se ha descubierto que **al sumergir nanotubos en agua el agua penetra en el interior de los nanotubos** abriendo (puede consultar la [noticia](#)), por tanto, una nueva vía de aplicación de nanotubos: dispositivos nanofluídicos.

Hay muchas aplicaciones que se pueden beneficiar del conocimiento del comportamiento del transporte de agua a través de CNT. En general la idea es utilizar a los **CNT como si de canales se tratase**. Algunas de estas **aplicaciones** son: **celdas electroquímicas, biosensores, ‘laboratorios en un chip’** y en general las áreas que más se beneficiarán de estas aplicaciones serán la **medicina, la biología y la seguridad**.

Otra posible aplicación se puede leer en la noticia [‘Los nanotubos pueden desalinizar el agua del mar’](#) (febrero 2007), en la que investigadores del Rensselaer Polytechnic Institute de EE.UU. dicen haber logrado un sistema de control de flujo de agua a través de CNT que podría llevar, entre otras aplicaciones, a la obtención de agua potable a partir de agua salada.

El comportamiento de los fluidos en los CNT dista mucho de ser intuitivo, En cuanto se reduce la escala, los fenómenos de tensión superficial y capilaridad varían con respecto a su comportamiento en la macroescala. Algún ejemplo de esto lo constituyen los temas tratados en los artículos [Flow-induced flutter instability of cantilever carbon nanotubes](#) y [Vibration and instability of carbon nanotubes conveying fluid](#) ambos de la Universidad de Alberta, Canadá (2005) en los que se comenta la vibración que induce en los nanotubos la circulación de fluido en su interior, y se añade que si el nanotubo se ubica en una matriz de un material elástico, como un polímero, dicha vibración puede ser mitigada.

2.8.4 Tribología

Dos cuerpos en contacto y en movimiento relativo entre sí (los dientes de los engranajes, el flujo de un líquido en una tubería o el contacto del aire sobre las alas de un avión por poner algunos ejemplos cotidianos) presentan una serie de fenómenos en las **superficies de contacto** como son la **fricción** o el **desgaste** que caracterizan su

dinámica. La tribología es la ciencia que estudia esta interacción incluyendo otros muchos fenómenos, como la **lubricación**, la **adhesión** entre superficies, la **abrasión**, etc. que antes se estudiaban por separado.

Evidentemente los fenómenos tribológicos afectan directamente al funcionamiento de máquinas o sistemas como los mencionados en el párrafo anterior, pero a gran escala sus consecuencias van más allá de estos problemas funcionales. Según Rabinowicz en su libro "*friction and wear of the materials*", **se estima que un 10% de la energía producida a escala mundial se utiliza en superar algún tipo de fuerza de fricción**. Este dato por sí sólo coloca a la tribología como un parámetro importante a la hora de hablar de economía y ecología a nivel global.

En la documentación científica al respecto se han encontrado artículos que hablan tanto de lubricación líquida como sólida para reducir al máximo las pérdidas por fricción y el desgaste de los cuerpos en contacto.

En el caso de la **lubricación sólida**, el artículo Solid lubrication by multiwalled carbon nanotubes in air and in vacuum (2005), estudia la aportación de multiwalled tanto alineados como no alineados sobre un sustrato de cuarzo sobre el que se hacen deslizar otros materiales tanto en aire como en vacío. Entre las conclusiones a las que llega cabe destacar el **buen comportamiento tanto de la fricción como del desgaste** que presentan los materiales, la **elevada vida del lubricante** (por encima del millón de pasadas) y que la alineación de los nanotubos no es un requisito para esta aplicación, es más, el comportamiento es superior en nanotubos no alineados. En cuanto al comportamiento del recubrimiento con el tiempo se aprecia una cierta degradación y acortamiento de los nanotubos, si bien el rodamiento que sufren éstos sobre el resto de recubrimiento parece ser una de las causas del bajo coeficiente de fricción. Otro aspecto que parece favorecer el uso de los CNT como lubricantes sólidos es su alto módulo elástico, que hace que, al no deformarse, ofrezcan una superficie de contacto mínima.

Parece interesante también el siguiente artículo sobre comportamiento del **agua aditivada con CNT funcionalizados para aplicaciones de lubricación**, Tribological behaviors of surfactant-functionalized carbon nanotubes as lubricant additive in water (2006). En él se muestra una comparación de los valores de fricción y desgaste de agua, y tres tipos de agua aditivada: con MWNT, con material tensoactivo SDS, y con MWNT funcionalizados con SDS. Se aprecia que la funcionalización facilita la solubilidad de los MWNT en agua y que reduce la fricción y el desgaste de las superficies, siendo esta reducción dependiente de la buena solubilidad de los MWNT. Parece que el mecanismo de reducción de tensiones también en este caso viene favorecido por el acortamiento que sufren los MWNT con el uso y que rellenan huecos existentes entre las superficies en contacto facilitando el deslizamiento de las superficies.

2.8.5 NEMS

Los NEMS (**Nano-Electro-Mechanical Systems**) son dispositivos que pueden contener elementos mecánicos, electromagnéticos, de fluidos, ópticos y térmicos, pero fabricados con técnicas propias de la microelectrónica. Realizan funciones de **sensores y/o actuadores**, al igual que los MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems). Se diferencian de estos últimos en que los primeros tienen un tamaño “nano” (típicamente comprendidos entre 1 y 100 nm) y los segundos tienen dimensiones en el rango de las micras. Estas reducidas dimensiones en las que aumentan los efectos de superficie y, sobre todo, la presencia de fenómenos cuánticos, implican diferentes técnicas de fabricación.

Los nanotubos de carbono son buenos candidatos a la producción de NEMS. En el documento “[Nanoelectromechanical Systems: Experiments and Modeling](#)” pueden verse diferentes ejemplos de NEMS fabricados con nanotubos. En la mayoría de los casos aprovechan la deformación que sufren los nanotubos por fuerzas electrostáticas cuando son expuestos a un campo eléctrico. Se basan en este efecto los **interruptores** ya descritos en el apartado [2.1.4. Memorias](#) de este informe (la misma tecnología puede usarse como memoria o como interruptor). Otras aplicaciones serían:

- **Nanopinzas.** Dos nanotubos pegados por un extremo a puntas de otro material, al ser sometidos a voltajes opuestos se deforman y los extremos libres se tocan.
- **Osciladores.** Nanotubos suspendidos por ambos extremos de electrodos y a cierta distancia de un tercer electrodo situado debajo se deforma al aplicar una diferencia de potencial entre los electrodos superiores y el inferior. Si es una diferencia de potencial variable, el nanotubo se deformará de forma variable y oscilará si el voltaje cambia de acuerdo con la frecuencia de resonancia del nanotubo.

Los osciladores NEMS se han propuesto para muchas aplicaciones en los últimos años: **detección de masa** (debido a los cambios de vibración que sufren al entrar en contacto con otras partículas; la modificación en la vibración está directamente relacionada con la masa de la partícula detectada), **procesado de señal, radiofrecuencias,...**

Dentro de las investigaciones que se están realizando en esta área es importante comprender verdaderamente cuáles son los mecanismos de respuesta de los CNT ante las vibraciones, en esta línea destacan los siguientes artículos:

[Effects of inicial stress on non-coaxial resonance of multi-wall carbon nanotubes](#) (2006), dónde se comenta la influencia de una sollicitación preexistente (térmica, de carga, de incompatibilidad con el material en el que está inmerso el CNT) en el CNT antes de ser sometido a vibración. Sus conclusiones son que el comportamiento ante la vibración es dependiente de esa sollicitación inicial y que el comportamiento es diferente si se trata de sollicitación a tensión o a compresión.

- **Cantilevers.** Se basan en que si a un nanotubo de carbono dispuesto de forma horizontal y sujeto por un extremo a un electrodo, se le aplica un campo eléctrico variable desde otro electrodo situado debajo, se curvará por su parte libre alcanzando dos posiciones de equilibrio en las que existe un balance adecuado entre las fuerzas elástica, electrostática y de Van der Waals.
- **Motores rotatorios.** Un ejemplo puede ser un nanotubo con sus dos extremos sujetos a dos electrodos y suspendido en el aire con una placa metálica pegada en su punto medio. De forma perpendicular a los electrodos que sujetan el nanotubo se disponen otros dos electrodos. Aplicando distintos voltajes a la placa y a los electrodos se consigue que la placa dé vueltas. En este caso se aprovechan las propiedades de torsión de los nanotubos.

Hay otras concepciones de motores en la bibliografía como es el caso del presentado en "[Laser spinning of nanotubes: A path to fast-rotating microdevices](#)" (2002), donde se estudia la rotación de los CNT generada por haces de luz láser, en concreto del espectro IR.

- **Nanocojinetes.** En las aplicaciones NEMS puede requerirse movimiento rotatorio de alta frecuencia de algún elemento. Para lograr este objetivo es necesario que el elemento que hace de eje de giro presente la mínima oposición a ese movimiento, es decir, la fricción entre la parte móvil (giratoria) y el árbol sea mínima.

Los **DWNT** en particular, y los **MWNT** en general, pueden ser candidatos a esta aplicación, ya que presentan una **disposición natural en cilindros concéntricos que pueden rotar casi sin interacción**. Se puede ampliar información en el artículo "[Atomistic simulations of Double-Walled Carbon Nanotubes \(DWCNTs\) as rotational bearings](#)" (2003).

Un aspecto también relevante en este tipo de dispositivos es la transferencia de carga entre los diferentes tubos de los nanotubos (DWNT o MWNT). Según se desprende de "[Load transfer issues in the tensile and compressive behavior of multiwall carbon nanotubes](#)" (2006), la transferencia de carga entre el anillo externo y el interno es prácticamente nula, con lo que los anillos internos no están participando en la absorción de las fuerzas del exterior. En muchas aplicaciones, como por ejemplo en materiales nanorreforzados con MWNT, es importante que todos los anillos participen para absorber esfuerzos externos. Según se cuenta en el anterior artículo la transferencia aumenta al insertar átomos intersticiales entre las diferentes capas.

2.8.6 MEMS

Como ya se ha comentado en el apartado [2.8.5. NEMS](#), los MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) son dispositivos que pueden contener elementos mecánicos, electromagnéticos,

de fluidos, ópticos y térmicos, se fabrican con técnicas propias de la microelectrónica, realizan funciones de sensores y/o actuadores y que tienen dimensiones micrométricas.

Es muy frecuente la utilización de los nanotubos de carbono para fabricar compuestos nanorreforzados que se usan como **materiales estructurales** en los componentes mecánicos de los MEMS.

Además, se pueden incorporar nanotubos de carbono en los MEMS para desarrollar funciones específicas como **triodos, emisores de campo**, etc., como se comenta en el artículo "Packaging of nanostructured microelectromechanical systems microtriode devices". Para ello es necesario el desarrollo de técnicas que permitan crecer los nanotubos directamente sobre los elementos de los MEMS.

CAPÍTULO 3

Análisis de información

3.1 Análisis de referencias científicas (PÁG. 75)

3.2 Análisis de proyectos (PÁG. 107)

3.3 Análisis de patentes (PÁG. 138)

En esta sección se analizan los resultados encontrados en las bases de datos consultadas.

En el [Anexo I Bases de datos y sentencias de búsqueda](#) se detallan las bases de datos y las sentencias de búsqueda utilizadas. Se muestra el número total de resultados obtenidos en las búsquedas y el número de resultados realmente relevantes, en los que se basa este informe, seleccionados como consecuencia de un análisis detallado realizado por los miembros del CIMTAN.

Se analizan en primer lugar referencias científicas, seguidas de proyectos y, por último, patentes.

3.1 Análisis de referencias científicas

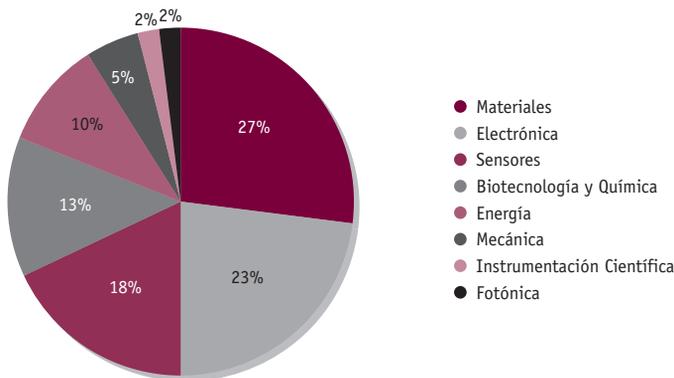
Para hacer el análisis de referencias científicas se hicieron búsquedas en la base de datos “Curren Contents” como puede leerse en el [Anexo I Bases de datos y sentencias de búsqueda](#). Nuestras herramientas de acceso a la misma nos proporcionaron un total de 1000 resultados. Después de analizar el contenido de todos ellos se seleccionaron [659](#) para la elaboración de este informe y en ellos se basa el análisis expuesto a continuación.

Consideramos como referencias científicas artículos y textos similares.

3.1.1 Análisis global

Realizaremos en este apartado un análisis global de todas las referencias científicas, [659](#) en total. En apartados posteriores se harán análisis específicos para cada tema.

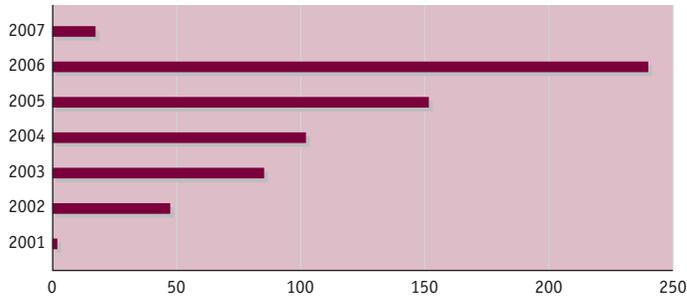
El siguiente gráfico muestra la distribución de **temas** encontrados.



Aunque el tema principal son materiales hay que destacar el gran solapamiento que existe con otros temas como la energía, los sensores, etc. Los materiales que contienen nanotubos de carbono aprovechan las propiedades de éstos de forma que, por ejemplo, un compuesto así desarrollado puede utilizarse como electrodo de una pila de combustible. En estos casos las referencias científicas se han incluido en los dos apartados porque, por un lado hay que desarrollar el compuesto con la problemática que esto conlleva (dispersión, alineamiento, etc.) y por otro hay que conseguir que cumpla correctamente su misión.

Los únicos materiales que no están incluidos, además, en otra clasificación son los que presentan extraordinarias propiedades mecánicas y tienen aplicaciones estructurales. Los materiales estructurales representan un 13,3% de todos los materiales y un 5,8% del total de referencias científicas (659) tratadas.

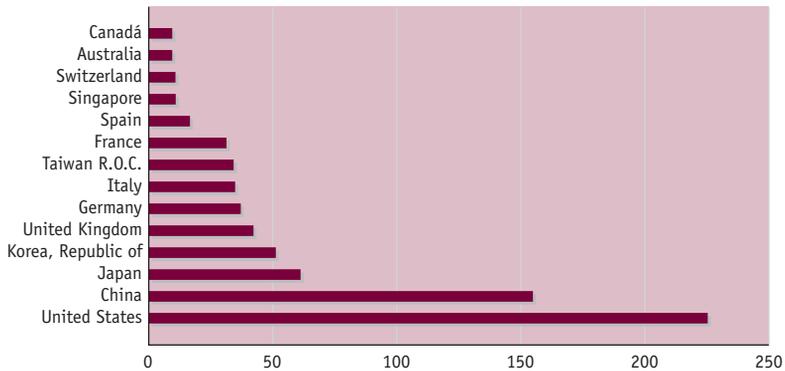
La **evolución anual** de las referencias científicas es la siguiente:



El eje de abscisas refleja el número de referencias científicas y el de ordenadas los años. Los datos del 2007 no son significativos por tratarse del año en curso.

Vemos una clara tendencia ascendente en el número de publicaciones que hacen referencia a aplicaciones de nanotubos de carbono, lo que demuestra un interés creciente por el tema.

Los **países** que más publican sobre aplicaciones de nanotubos de carbono son los siguientes:



El eje de abscisas muestra el número total de referencias científicas y el de ordenadas los países. Sólo se han mostrado aquellos países que aparecían en más de 9 documentos.

Vemos el claro liderazgo de Estados Unidos, pero también China es un país muy importante. Además, los países en segundo, tercero y cuarto lugar son asiáticos, reflejándose aquí la importancia de esta región en la investigación de aplicaciones de nanotubos de carbono. El país europeo mejor situado es Reino Unido, aunque seguido muy de cerca por Alemania e Italia. España aparece en décimo lugar con 17 publicaciones.

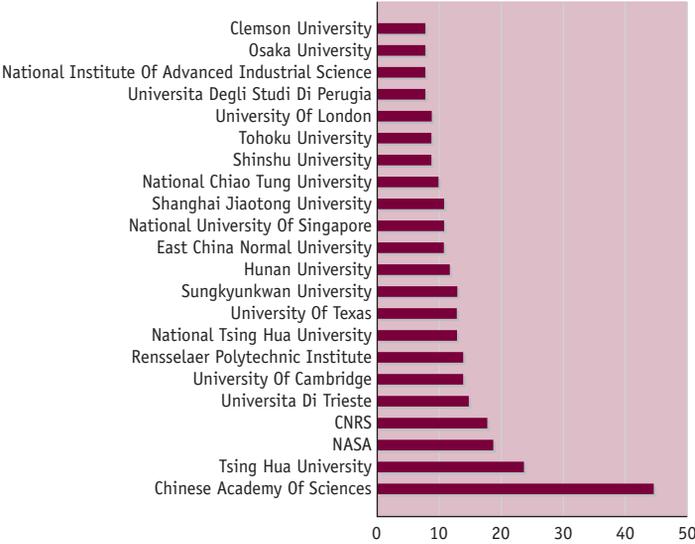
En el [Anexo II Referencias científicas](#) pueden consultarse las referencias científicas publicadas en cada país.

En la siguiente tabla puede verse el número de referencias científicas publicadas en las distintas **regiones** mundiales:

<i>Región</i>	<i>Número de publicaciones</i>
Asia	340
Norteamérica	236
Europa	229
Australia	10
Centro y sudamérica	9
África	2

Puede observarse cómo a pesar de ser Estados Unidos el país que más publica, es Asia la región con mayor número de referencias científicas. Europa tiene un número de publicaciones muy similar a Norteamérica, teniendo en cuenta que ésta región comprende Estados Unidos con 226 publicaciones y Canadá con 10.

La distribución de publicaciones por **instituciones** es la siguiente:

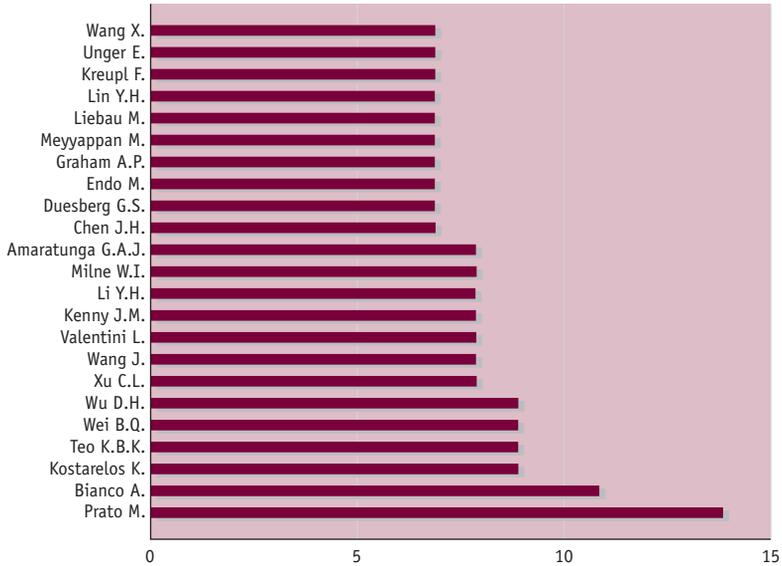


El eje de abscisas muestra número de documentos y el de ordenadas las instituciones. Sólo se muestran las instituciones que han publicado más de 7 documentos.

Puede verse el papel tan destacado de la Academia de Ciencias de China. Le siguen la Universidad Tsing Hua también de China. A continuación aparecen la NASA estadounidense y el CNRS francés.

En el [Anexo II Referencias científicas](#) pueden consultarse las referencias científicas publicadas por cada institución.

El siguiente gráfico muestra la distribución de publicaciones por **autores**:

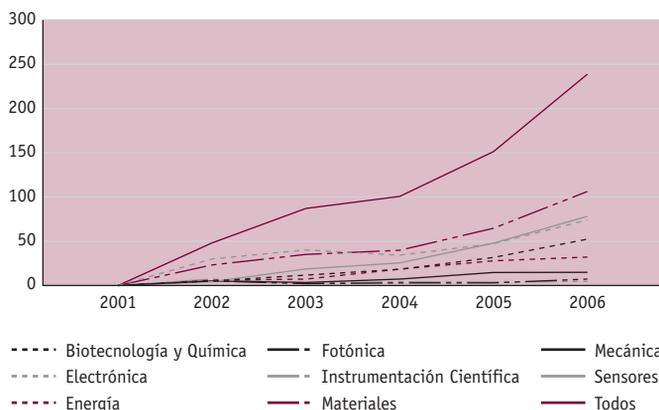


El eje de abscisas muestra el número de referencias científicas publicadas y el de ordenadas los autores. Sólo se muestran los autores con más de 6 publicaciones.

El autor con mayor número de publicaciones es Maurizio Prato de la Universidad de Trieste en Italia que trabaja principalmente en biotecnología y química, concretamente en nanomedicina. En segundo lugar aparece Alberto Bianco del CNRS en Francia que trabaja en los mismos temas.

En el [Anexo II Referencias científicas](#) pueden consultarse las referencias científicas publicadas por cada autor.

Aunque a continuación se hará un análisis detallado de las distintas aplicaciones, nos ha parecido interesante incluir en este apartado de análisis general una visión comparativa de la evolución anual del número de publicaciones que tratan sobre los distintos temas. El resultado ha sido el siguiente gráfico:



En el eje de abscisas se muestran los años y en el de ordenadas el número de referencias científicas.

Se observa una clara tendencia ascendente en todos los temas. Es interesante destacar que si bien en cuanto a número total de publicaciones la electrónica supera a los sensores, en el año 2006 el segundo tema supera al primero y, además, aumenta la pendiente de su curva ascendente.

En cuanto a países y regiones mundiales principales en los distintos temas, hemos obtenido la siguiente distribución, como podrá verse en los apartados que analizan cada tema específico:

<i>Tema</i>	<i>País principal</i>	<i>Región principal</i>
Electrónica	EE.UU.	Asia
Sensores	EE.UU. y China	Asia
Instrumentación Científica	EE.UU.	Norteamérica
Fotónica	EE.UU.	Asia
Materiales	EE.UU.	Asia
Biotecnología y Química	EE.UU.	Asia
Energía	EE.UU.	Asia
Mecánica	EE.UU.	Norteamérica
Todos	EE.UU.	Asia

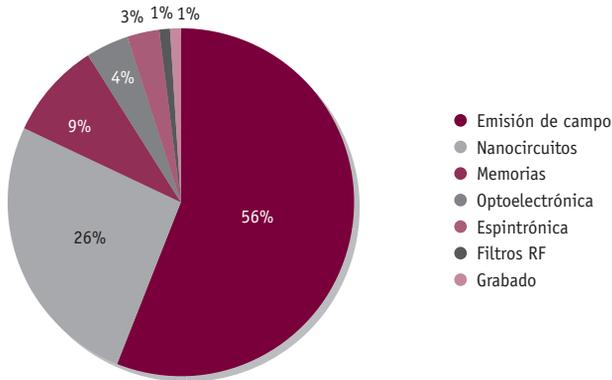
Puede verse la importancia de la región Asiática y en concreto de China, país que, en cuanto a número de publicaciones, aparece siempre en segundo lugar después de Estados Unidos, excepto en tres temas: sensores, donde iguala a Estados Unidos, instrumentación científica, donde China no aparece, y fotónica, donde China aparece en tercer lugar después de Estados Unidos y Japón.

3.1.2 Análisis temático

Se analizan en los apartados siguientes las referencias científicas que tratan sobre los distintos temas en los que se ha agrupado la información.

3.1.2.1 Electrónica

Un total de 230 referencias científicas mencionan la electrónica como aplicación de los nanotubos de carbono. Con ellas se ha elaborado el siguiente gráfico de distribución de contenido:



Puede observarse que destaca clarísimamente la emisión de campo sobre los demás temas, siendo también importantes los nanocircuitos.

El tema “emisión de campo” se ha desglosado en los siguientes subtemas, con el número de resultados mostrado:

<i>Emisión de campo</i>	<i>Número de resultados</i>
En general	66
Displays	33
Amplificadores de microondas	8
Triodos	7
Lámparas y tubos luminiscentes	6
Litografía de haz de electrones	4
Fuentes de rayos x	3
Fuentes sem	3
Tubos de rayos catódicos	2
Betatrones	1

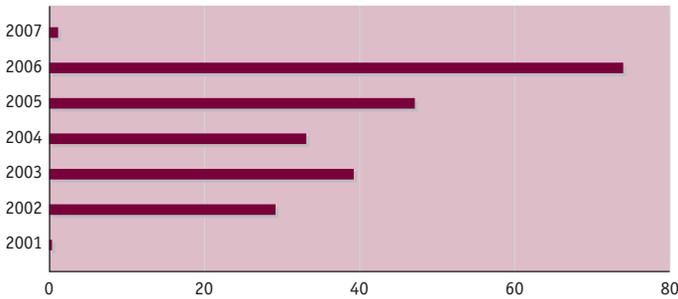
Si descartamos las 66 referencias científicas que tratan sobre emisión de campo en general sin especificar más, el tema más importante son las pantallas planas.

En el caso de nanocircuitos, la distribución por subtemas es la siguiente:

<i>Nanocircuitos</i>	<i>Número de Resultados</i>
Transistores	38
Interconectores	25
Diodos	4

En este caso son los transistores, especialmente los FET, el tema destacado. También son muy importantes los interconectores, frente a los diodos que son todavía un tema poco investigado.

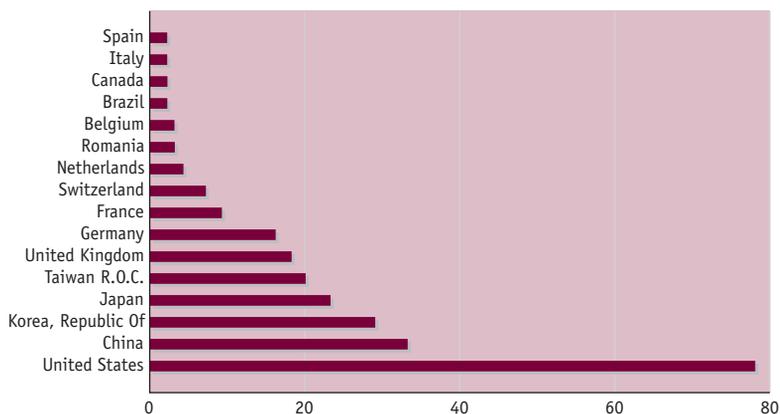
La **evolución anual** de las publicaciones que mencionan la electrónica como aplicación de los nanotubos de carbono es la siguiente:



En el eje de abscisas se muestra el número de referencias científicas y en el de ordenadas los años.

Despreciando los datos del 2007, que no son significativos por ser el año en el que estamos, la tendencia global es ascendente, a pesar del pequeño descenso del año 2004.

La distribución por **países** de las publicaciones es la que se muestra en el gráfico adjunto.



El eje de abscisas refleja el número de publicaciones y el de ordenadas los países. Sólo aparecen en el gráfico los países con más de 2 publicaciones.

Puede observarse el claro liderazgo de Estados Unidos en este tema. España aparece en el puesto número 16 con 3 publicaciones.

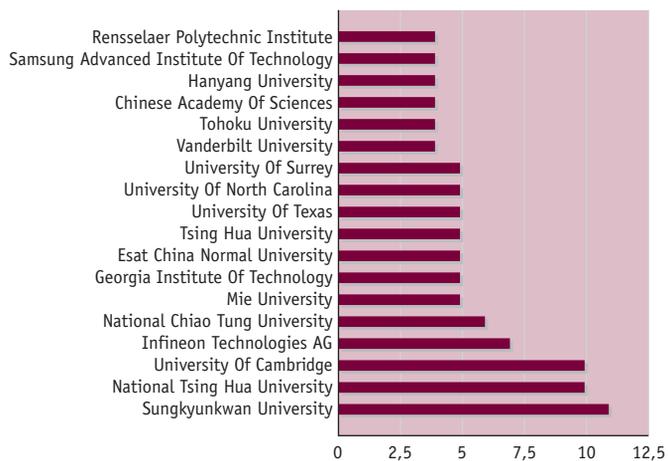
En el [Anexo II Referencias científicas](#) pueden consultarse las referencias científicas publicadas en cada país.

En la siguiente tabla puede verse el número de referencias científicas publicadas en las distintas **regiones** mundiales:

<i>Región</i>	<i>Número de Publicaciones</i>
Asia	118
Europa	84
Norteamérica	82
Centro y Sudamérica	5
Australia	2

Aunque Estados Unidos es el país con mayor número de publicaciones, si agrupamos los países por regiones la más destacada es Asia. Incluso Europa supera a Norteamérica, agrupando esta última a Estados Unidos con 79 publicaciones y a Canadá con 3.

La distribución por **instituciones** es la siguiente:

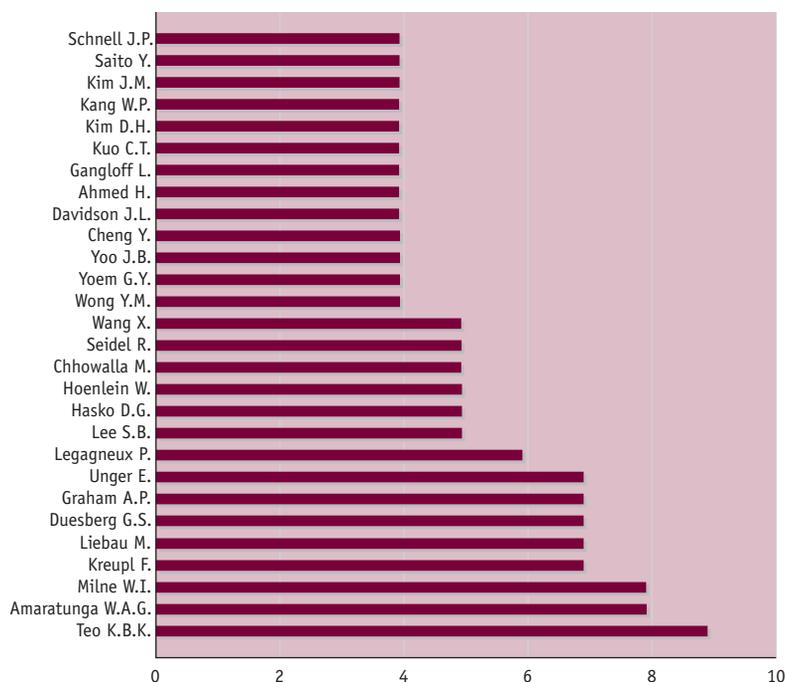


El eje de abscisas muestra el número de documentos y el de ordenadas las instituciones. Sólo aparecen las instituciones con más de 3 documentos.

La institución con más publicaciones es la Universidad Sungkyunkwan de Corea, seguida por la Universidad Nacional Tsing Hua de China y la Universidad de Cambridge en Reino Unido. En los tres casos sus publicaciones tratan fundamentalmente sobre emisión de campo.

En el [Anexo II Referencias científicas](#) pueden consultarse las referencias científicas publicadas por cada institución.

Los **autores** que más publican son:



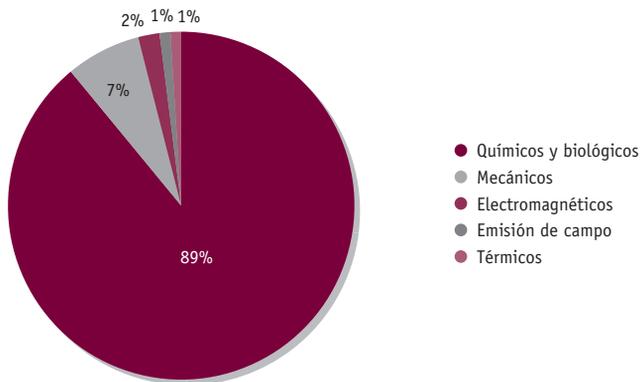
En el eje de abscisas aparece el número de publicaciones y en el de ordenadas los autores. Sólo se muestran los autores con más de 3 documentos.

El autor que más publica es Keneth B.K. Teo de la Universidad de Cambridge que publica fundamentalmente artículos sobre emisión de campo. A continuación aparecen G.A.J. Amaratunga y W.I. Milne de la misma Universidad y que publican también sobre emisión de campo.

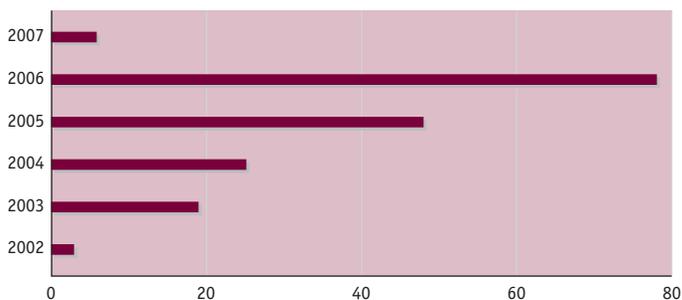
En el Anexo II Referencias científicas pueden consultarse las referencias científicas publicadas por cada autor.

3.1.2.2 Sensores

Con las 185 referencias científicas que tratan sobre sensores se ha elaborado el siguiente gráfico de distribución de tipos, donde puede observarse la clara superioridad de los químicos y biológicos sobre los demás:



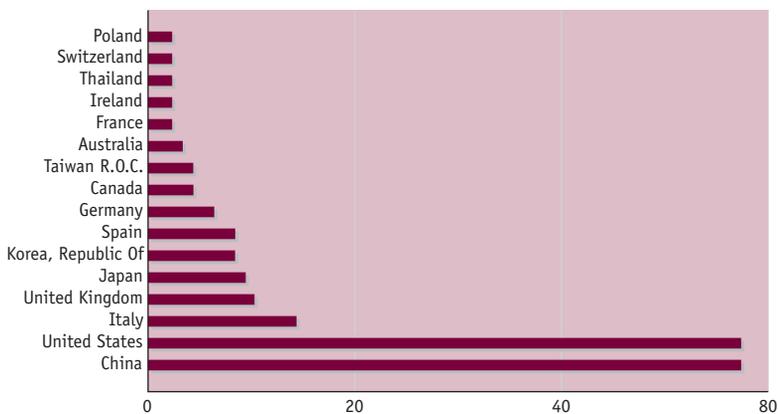
La **evolución anual** de las publicaciones que tratan sobre sensores es la siguiente:



El eje de abscisas muestra número de referencias científicas y el de ordenadas los años. Los datos del 2007 no son significativos por ser el año en curso durante la elaboración de este informe.

Puede observarse que la tendencia es claramente ascendente.

Los **países** que más publican sobre sensores son:



El eje de abscisas muestra número de documentos y el de ordenadas los países. Sólo aparecen los países con más de 2 publicaciones.

Vemos que en este tema Estados Unidos y China están igualados, destacando ambos ampliamente frente a Italia, tercer país en la lista. España ocupa el séptimo puesto con 9 publicaciones.

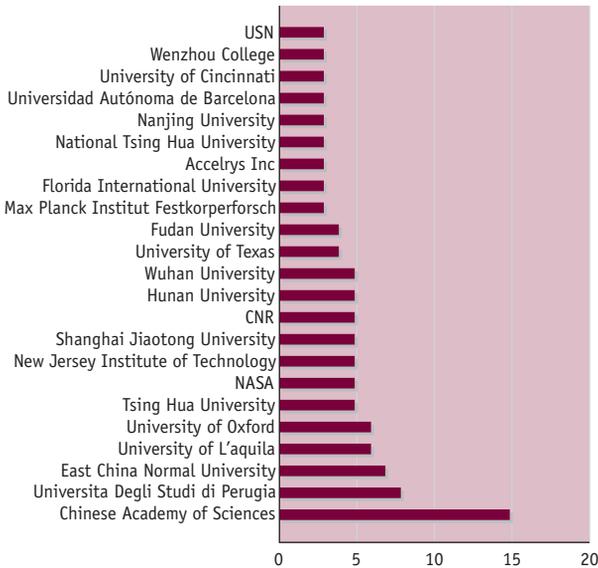
En el [Anexo II Referencias científicas](#) pueden consultarse las referencias científicas publicadas en cada país.

En la siguiente tabla puede verse el número de referencias científicas publicadas en las distintas **regiones** mundiales:

<i>Región</i>	<i>Número de Publicaciones</i>
Asia	92
Norteamérica	63
Europa	59
Australia	4
Centro y sudamérica	3
África	1

Puede verse cómo Asia es la región con mayor número de publicaciones, seguido de Norteamérica que comprende a Estados Unidos con 58 publicaciones y Canadá con 5.

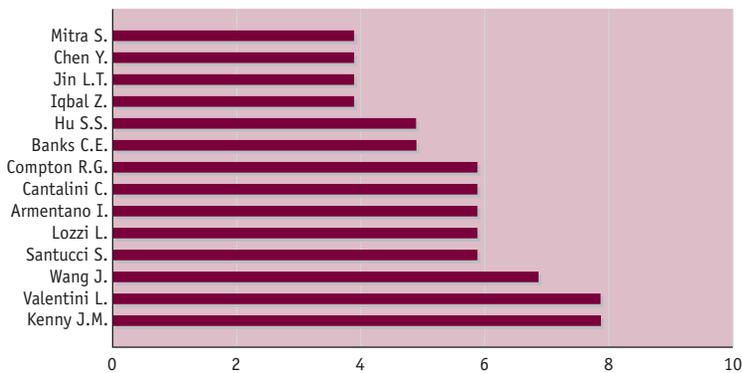
Las **instituciones** que más publican son:



La principal institución en cuanto a número de publicaciones en sensores es la Academia de Ciencias China. Le siguen la Universidad Degli Studi di Perugia en Italia y la Universidad Normal de China del Este. En los tres casos el tema fundamental de sus publicaciones son los sensores químicos y biológicos. En vigésimo puesto aparece la Universidad Autónoma de Barcelona.

En el [Anexo II Referencias científicas](#) pueden consultarse las referencias científicas publicadas por cada institución.

Los **autores** que más publican son:



En el eje de abscisas se muestra el número de publicaciones y en el de ordenadas los autores. Sólo se muestran los autores con más de 3 publicaciones.

Hay dos autores destacados con 8 publicaciones. Son J.M. Kenny de la Universidad Degli Studi di Perugia en Italia que trabaja en sensores químicos, sobre todo de gas, y L. Valentini de la misma Universidad con publicaciones sobre los mismos temas.

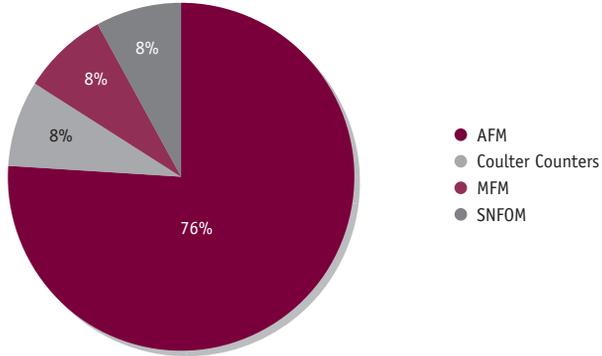
En el [Anexo II Referencias científicas](#) pueden consultarse las referencias científicas publicadas por cada autor.

3.1.2.3 Instrumentación científica

De las 22 referencias científicas encontradas sobre instrumentación científica, 1 trata sobre contadores coulter y 21 sobre microscopios de sonda de barrido. Dentro de estos, la distribución temática sería la siguiente:

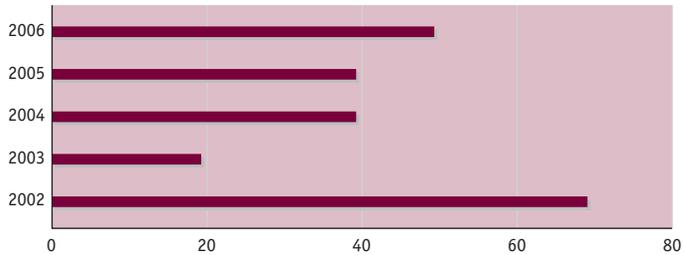
<i>SPM</i>	<i>Número de Resultados</i>
AFM	9
MFM	1
SNFOM	1

Así, la distribución de todos los temas es esta:



Se observa un claro interés por aplicar los nanotubos de carbono como puntas de sonda en microscopios de fuerza atómica, frente a otros tipos de microscopios de sonda de barrido y contadores coulter.

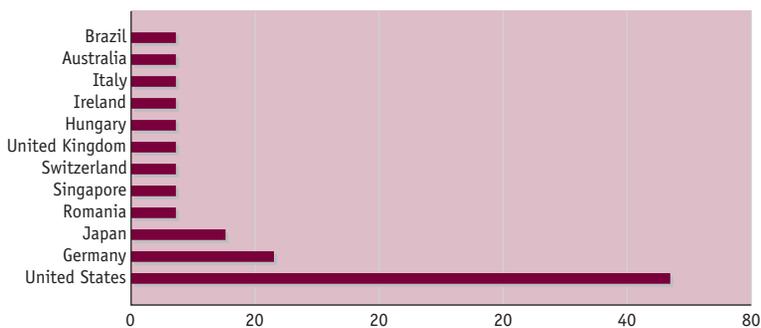
La **evolución anual** de publicaciones sobre aplicación de nanotubos de carbono a instrumentación científica es la siguiente:



En el eje de abscisas está representado el número de publicaciones y en el de ordenadas los años. No hay ninguna referencia científica sobre este tema en el año 2007.

Vemos que hubo un claro interés en el año 2002 que luego decreció. A partir del 2003 la tendencia es creciente.

En el siguiente gráfico puede verse claramente cómo el **país** más interesado en estas aplicaciones es Estados Unidos, seguido de Alemania y Japón.



En el eje de abscisas está representado el número de referencias científicas y en el de ordenadas el país. Se muestran todos los países mencionados en las referencias científicas.

Llama la atención en esta representación la ausencia de China, país con gran número de publicaciones en otros temas. España no tiene publicaciones sobre este tema.

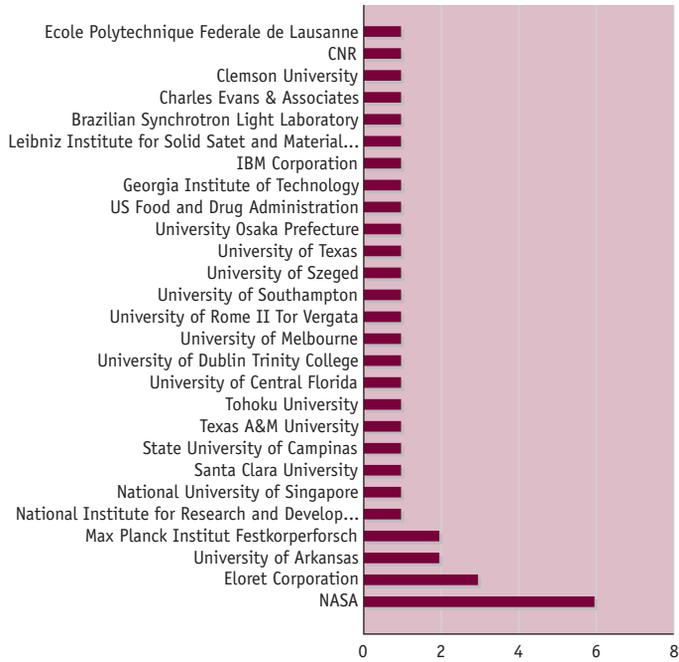
En el [Anexo II Referencias científicas](#) pueden consultarse las referencias científicas publicadas en cada país.

En la siguiente tabla puede verse el número de referencias científicas publicadas en las distintas **regiones** mundiales:

<i>Región</i>	<i>Número de Publicaciones</i>
Norteamérica	11
Europa	9
Asia	3
Australia	1
Sudamérica	1

Igual que en la distribución por países, vemos que el mayor interés en la aplicación de los nanotubos de carbono en instrumentación científica está en Norteamérica que, en este caso, sólo hace referencia a Estados Unidos.

Las **instituciones** más relevantes se muestran a continuación:

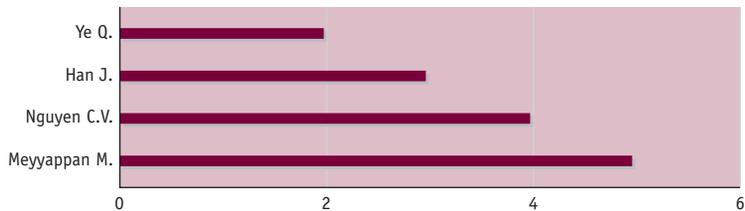


En el eje de abscisas se muestra número de documentos y en el de ordenadas instituciones. Se muestran todas las instituciones nombradas en las referencias científicas.

En este caso la institución que demuestra mayor interés por estos temas es la NASA, en Estados Unidos, seguida por la empresa norteamericana Eloret Corporation y por la también norteamericana Universidad de Arkansas. En los tres casos sus publicaciones tratan sobre SPM en general y en el caso de la NASA, además, sobre AFM en concreto.

En el [Anexo II Referencias científicas](#) pueden consultarse las referencias científicas publicadas por cada institución.

Los **autores** más involucrados en este tema son los siguientes:



En el eje de abscisas se muestra número de documentos y en el de ordenadas autores. Sólo se incluyen autores con más de 1 publicación.

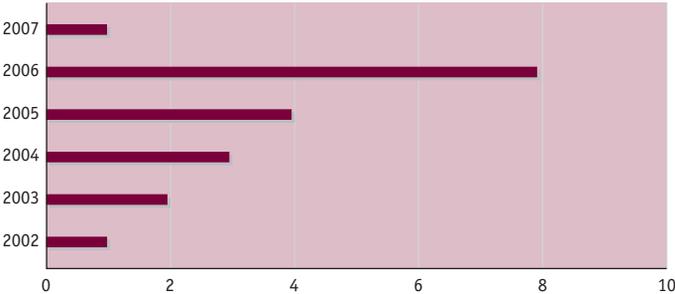
El autor que figura en mayor número de publicaciones es M. Meyyappan, seguido por C.V. Nguyen y J. Hang, los tres de la NASA.

En el Anexo II Referencias científicas pueden consultarse las referencias científicas publicadas por cada autor.

3.1.2.4 Fotónica

Un total de 19 referencias científicas tratan sobre fotónica.

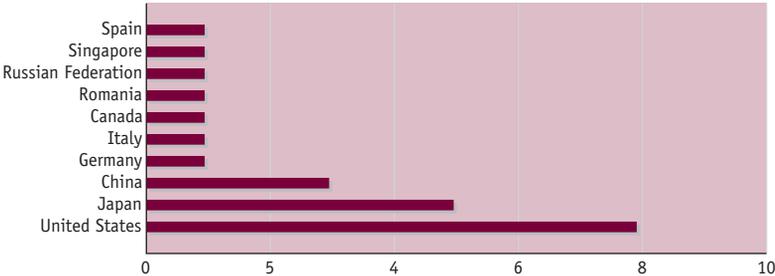
De su análisis se obtiene la siguiente **evolución anual**:



En el eje de abscisas aparece número de publicaciones y en el de ordenadas los años. Los datos del 2007 no son significativos.

Puede observarse cómo la fotónica despierta un interés creciente, que se ha intensificado muchísimo en el año 2006. Parece ser una aplicación prometedora para los nanotubos de carbono.

Los **países** que más publican sobre el tema son los siguientes:



En el eje de abscisas está reflejado el número de referencias científicas y en el de ordenadas los países. Se muestran todos los países que han aparecido en nuestros resultados.

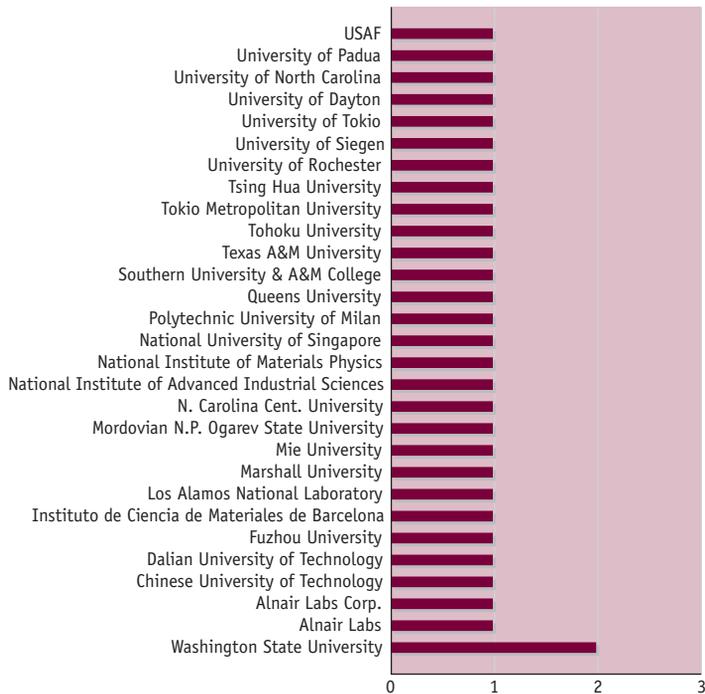
Vemos que Estados Unidos es el país más interesado en esta aplicación de los nanotubos de carbono, seguido por Japón y China. España también aparece en esta gráfica, con tan sólo 1 publicación.

En el [Anexo II Referencias científicas](#) pueden consultarse las referencias científicas publicadas en cada país.

En la siguiente tabla puede verse el número de referencias científicas publicadas en las distintas **regiones** mundiales:

<i>Región</i>	<i>Número de Publicaciones</i>
Asia	9
Norteamérica	9
Europa	5

Las principales **instituciones** que han publicado referencias científicas sobre este tema son:

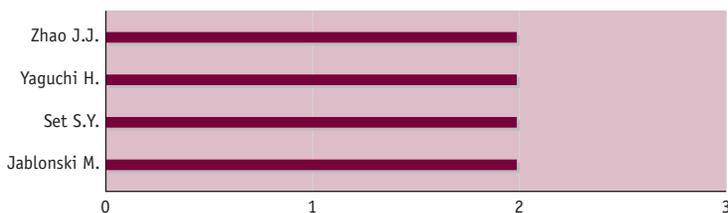


El número de referencias científicas se representa en el eje de abscisas y las instituciones en el de ordenadas. Se muestran todas las instituciones, sin restricciones en cuanto a número de publicaciones.

Si bien la Universidad de Washington es la institución principal con 2 publicaciones, que tratan sobre las propiedades ópticas y fotónicas de los nanotubos de carbono, es evidente que es un tema muy atomizado teniendo 1 publicación todas las demás instituciones. Entre ellas se encuentra el Instituto de ciencia de materiales de Barcelona, del CSIC.

En el [Anexo II Referencias científicas](#) pueden consultarse las referencias científicas publicadas por cada institución.

En el gráfico adjunto se muestran los **autores** que han publicado más de 1 documento, representando el número de referencias científicas en el eje de abscisas y los autores en el de ordenadas.



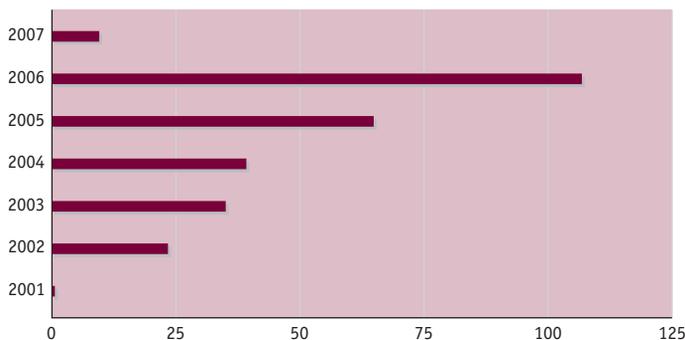
Los cuatro autores tienen dos publicaciones. Se trata de M. Jablonski, S.Y. Set y H. Yaguchi de los laboratorios Alnar Labs Corporation en Japón, y J.J Zhao de las Universidades Dalian State en China y de Washington en Estados Unidos.

En el [Anexo II Referencias científicas](#) pueden consultarse las referencias científicas publicadas por cada autor.

3.1.2.5 Materiales

Un total de 285 referencias científicas tratan sobre materiales.

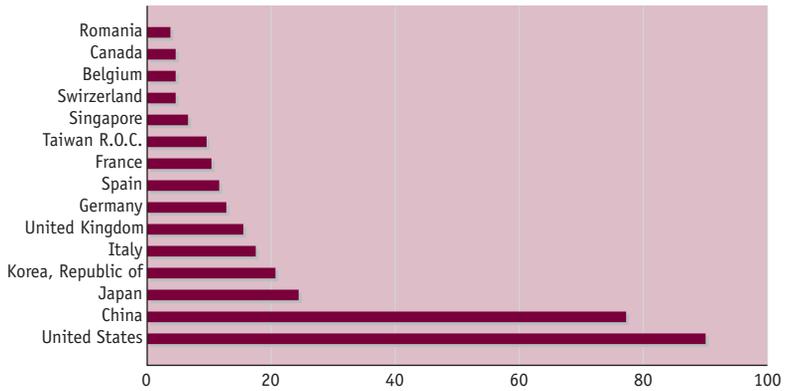
La **evolución anual** de las publicaciones sobre este tema es la siguiente:



El eje de abscisas representa el número de referencias científicas y el de ordenadas los años. Los datos del año 2007 no son representativos por tratarse del año en curso.

Se observa el aumento de publicaciones sobre materiales basados en nanotubos de carbono en los últimos años, con un total de 108 publicaciones en el 2006 frente a una única referencia científica en el año 2001.

Los **países** que más han publicado sobre este tema se muestran en el siguiente gráfico:



El eje de abscisas muestra número de referencias científicas y el de ordenadas países. Sólo aparecen países con más de 2 publicaciones.

Vemos cómo Estados Unidos y China se diferencian claramente del resto. España aparece en octavo lugar con 12 publicaciones.

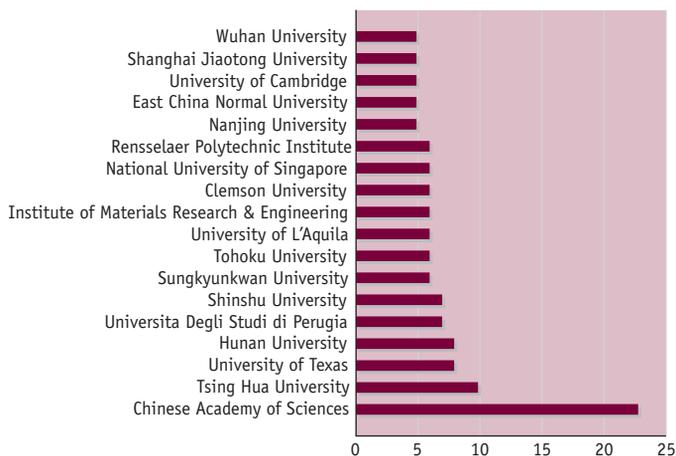
En el [Anexo II Referencias científicas](#) pueden consultarse las referencias científicas publicadas en cada país.

En la siguiente tabla puede verse el número de referencias científicas publicadas en las distintas **regiones** mundiales:

<i>Región</i>	<i>Número de publicaciones</i>
Asia	154
Europa	99
Norteamérica	96
Centro y sudamérica	6
Australia	3
África	2

Aunque Estados Unidos es el país con mayor número de publicaciones, es Asia la región más importante, seguida de Europa y Norteamérica, comprendiendo ésta última a Estados Unidos con 91 publicaciones y Canadá con 5.

Las **instituciones** que han publicado mayor número de referencias científicas son las siguientes:



El eje de abscisas represente número de referencias científicas y el de ordenadas instituciones. Sólo aparecen instituciones con más de 4 documentos.

La principal institución es la Academia de Ciencias China, seguida de la Universidad Tsing Hua también en China. A continuación aparece la Universidad de Texas en Estados Unidos y la Universidad Hunan en China.

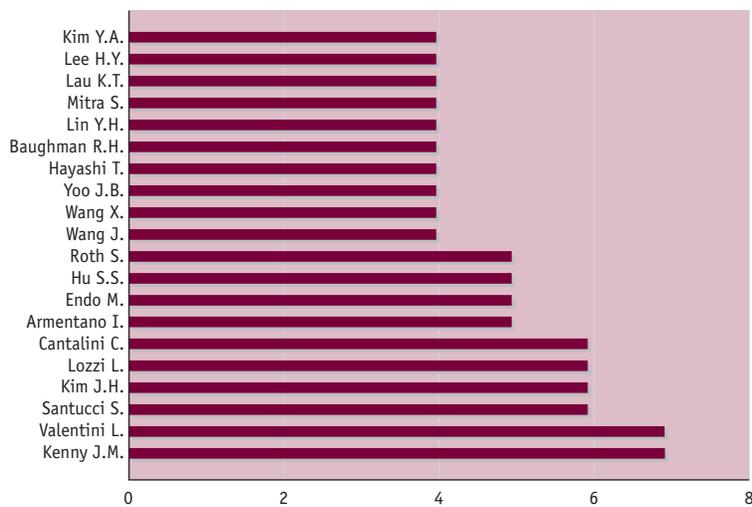
Las referencias científicas de la Academia de Ciencias China tratan sobre compuestos, con matrices tanto cerámicas como poliméricas, con aplicaciones muy diversas: emisión de campo, sensores químicos, células de combustible, adsorbentes, membranas, electrodos, etc.

La Universidad Tsing Hua publica referencias sobre las propiedades eléctricas y térmicas de los compuestos nanorreforzados con nanotubos de carbono, así como sus aplicaciones como sensores, electrodos, etc.

Las publicaciones de la Universidad de Texas tratan sobre compuestos aplicados al desarrollo de sensores y de fibras.

En el [Anexo II Referencias científicas](#) pueden consultarse las referencias científicas publicadas por cada institución.

Los **autores** que firman mas referencias científicas son los siguientes:



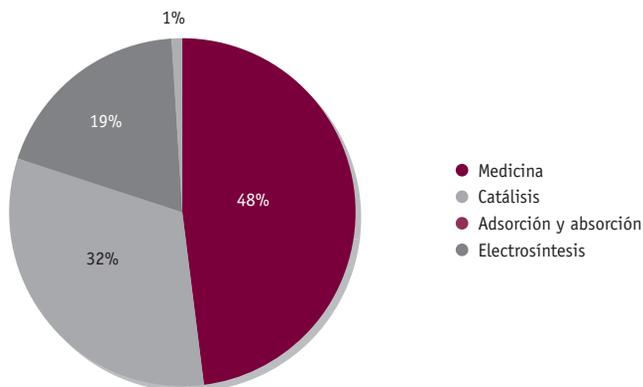
En el eje de abscisas se muestra el número de referencias científicas y en el de ordenadas los autores. Sólo aparecen autores con más de 3 documentos.

Destacan J.M. Kenny y L. Valentini. de la Universida degli Studi di Perugia en Italia, con un total de 7 publicaciones cada uno.

En el Anexo II Referencias científicas pueden consultarse las referencias científicas publicadas por cada institución.

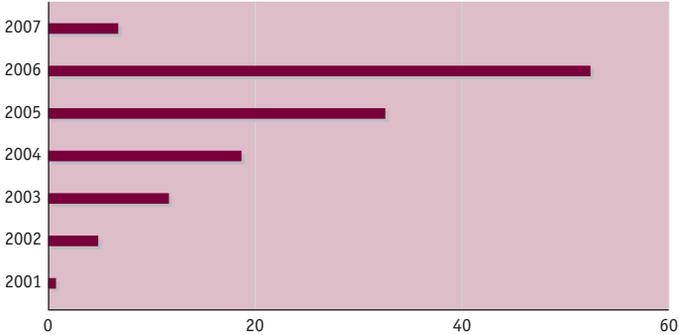
3.1.2.6 Biotecnología y química

Un total de 130 referencias científicas tratan sobre biotecnología y química, distribuidos entre los siguientes temas:



Destacan claramente las aplicaciones en medicina donde se espera que los nanotubos de carbono aporten soluciones muy interesantes.

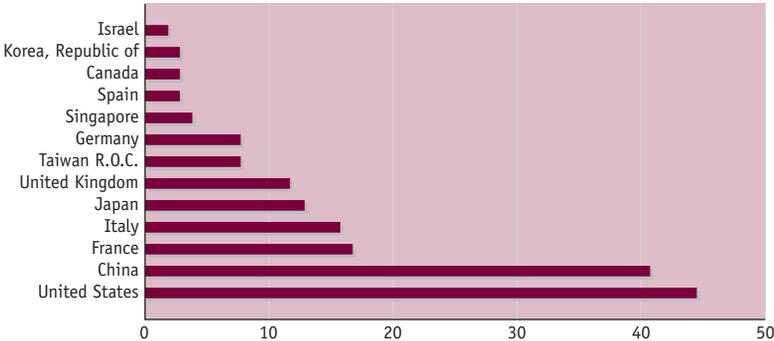
La **evolución anual** de publicaciones sobre biotecnología y química es la siguiente:



En el eje de abscisas está representado el número de publicaciones y en el de ordenadas el año. No son relevantes los datos del 2007 por tratarse del año en curso.

Puede verse en el gráfico la tendencia claramente ascendente en cuanto a número de referencias científicas.

La distribución por **países** es la siguiente:



En el eje de abscisas se representa el número de referencias científicas y en el de ordenadas los países. Sólo se representan países con más de 1 publicación.

Se aprecia claramente cómo Estados Unidos y China se distancian notablemente del resto en cuanto a número de publicaciones. España ocupa el décimo lugar con 3 publicaciones.

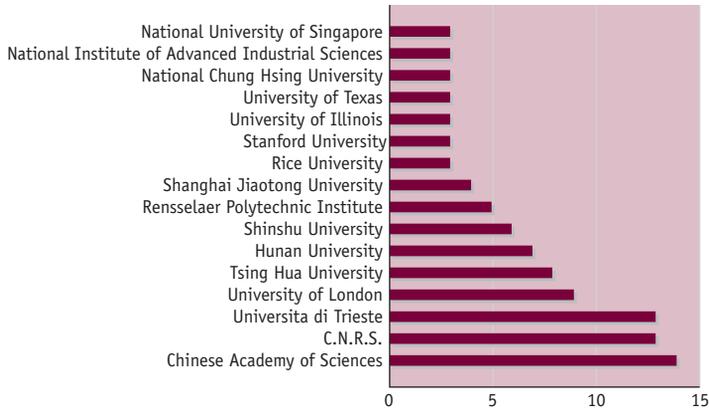
En el [Anexo II Referencias científicas](#) pueden consultarse las referencias científicas publicadas en cada país.

En la siguiente tabla puede verse el número de referencias científicas publicadas en las distintas **regiones** mundiales:

<i>Región</i>	<i>Número de Publicaciones</i>
Asia	73
Europa	60
Norteamérica	48
Australia	1

Aunque es Estados Unidos el país con mayor número de publicaciones sobre este tema, en cuanto a regiones es Asia la principal. Le siguen Europa y Norteamérica, refiriéndose esta última a Estados Unidos con 45 publicaciones y Canadá con 3.

Las **instituciones** principales son:



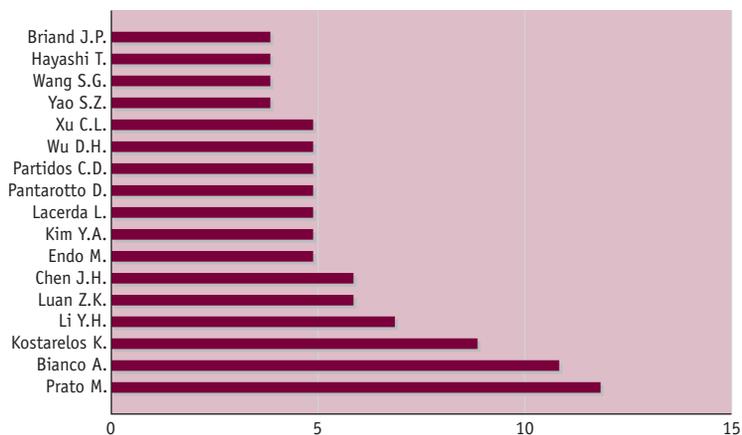
En el eje de abscisas aparece el número de publicaciones y en el de ordenadas las instituciones. Sólo están representadas instituciones con más de 2 documentos.

Puede observarse cómo las instituciones con mayor número de referencias científicas publicadas son la Academia de Ciencias China, el CNRS en Francia y la Universidad de Trieste en Italia.

Las referencias científicas publicadas por la Academia de Ciencias China tratan sobre medicina, catálisis y adsorbentes/absorbentes. En el caso del CNRS y la Universidad de Trieste, todas sus referencias científicas tratan sobre medicina.

En el [Anexo II Referencias científicas](#) pueden consultarse las referencias científicas publicadas por cada institución.

Los principales **autores** son los siguientes:



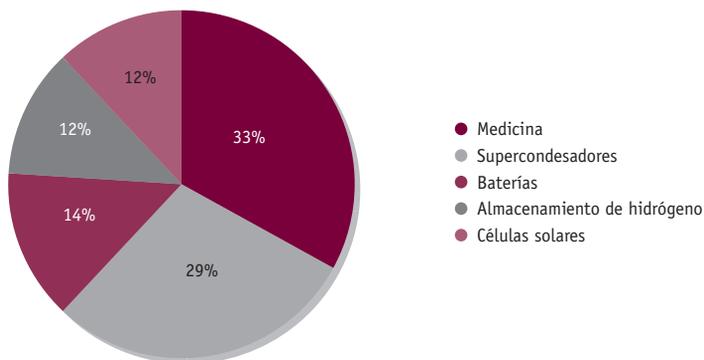
En el eje de abscisas aparece el número de referencias científicas y en el de ordenadas los autores. Sólo se muestran autores con más de 3 documentos publicados.

Vemos cómo entre los autores destaca Maurizio Prato de la Universidad de Trieste en Italia y Alberto Bianco del CNRS en Francia. En tercer lugar aparece K. Kostarelos de la Universidad de Londres en Reino Unido.

En el [Anexo II Referencias científicas](#) pueden consultarse las referencias científicas publicadas por cada institución.

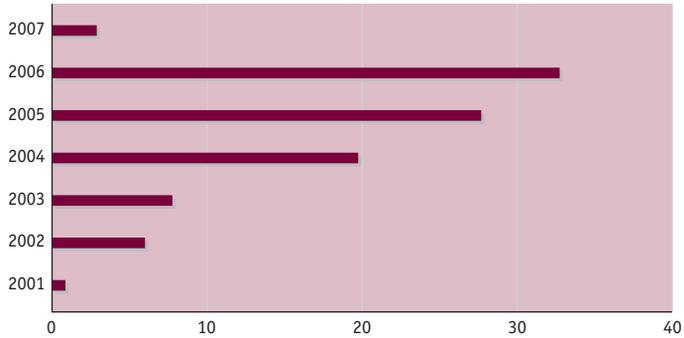
3.1.2.7 Energía

Hay un total de 99 referencias científicas que mencionan aplicaciones energéticas para los nanotubos de carbono. La distribución entre distintos temas se muestra en la gráfica siguiente:



Puede verse cómo la búsqueda de soluciones basadas en nanotubos de carbono para el desarrollo de pilas de combustible es el tema más tratado.

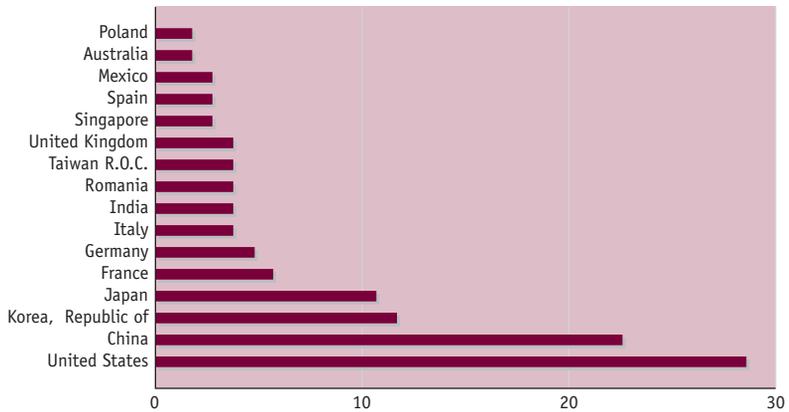
La **evolución anual** del número de publicaciones es la siguiente:



El eje de abscisas muestra el número de referencias científicas y el de ordenadas los años.

Teniendo en cuenta que los datos del 2007 no son significativos por tratarse del año en curso, la tendencia ascendente es claramente observable.

La distribución de las publicaciones por **países** es la siguiente:



En el eje de abscisas está representado el número de referencias científicas y en el de ordenadas los países, mostrándose sólo países con más de 1 documento publicado.

Estados Unidos es el país con mayor número de publicaciones seguido de cerca por China y a cierta distancia por Corea y Japón. España ocupa el puesto número 13 con 3 publicaciones.

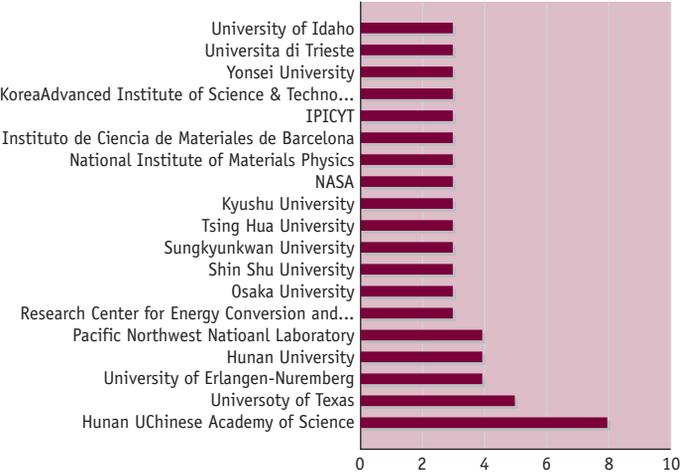
En el Anexo II Referencias científicas pueden consultarse las referencias científicas publicadas en cada país.

En la siguiente tabla puede verse el número de referencias científicas publicadas en las distintas **regiones** mundiales:

<i>Región</i>	<i>Número de Publicaciones</i>
Asia	58
Europa	35
Norteamérica	30
Centro y Sudamérica	4
Australia	2

Aunque es Estados Unidos el país con mayor número de publicaciones sobre este tema, es Asia la región más destacada, seguida de Europa y Norteamérica, haciendo referencia ésta última a Estados Unidos con 29 publicaciones y Canadá con 1.

Las principales **instituciones** implicadas se muestran a continuación:



El eje de abscisas representa el número de referencias científicas y el de ordenadas las instituciones. Sólo se muestran instituciones con más de 2 documentos.

La institución con más publicaciones es claramente la Academia de Ciencias China, seguida de la Universidad de Texas en Estados Unidos. A continuación vemos a la Universidad de Erlangen-Nuremberg en Alemania y la Universidad Hunan en China.

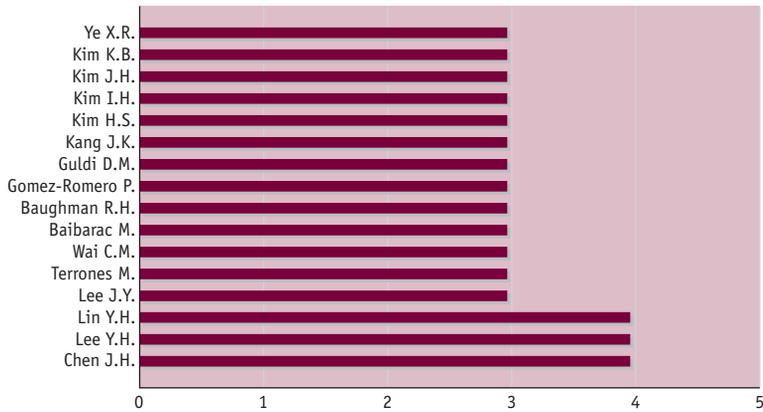
Las referencias científicas de la Academia de Ciencias Chinas tratan sobre temas diversos: pilas de combustible, supercondensadores, almacenamiento de hidrógeno, baterías de ión litio.

La Universidad de Texas tiene publicaciones sobre pilas de combustible, almacenamiento de energía en general, supercondensadores y baterías.

En el caso de la Universidad de Erlangen-Nuremberg todas sus publicaciones tratan sobre células solares.

En el [Anexo II Referencias científicas](#) pueden consultarse las referencias científicas publicadas por cada institución.

Los **autores** con mayor número de publicaciones se exponen en el siguiente gráfico:



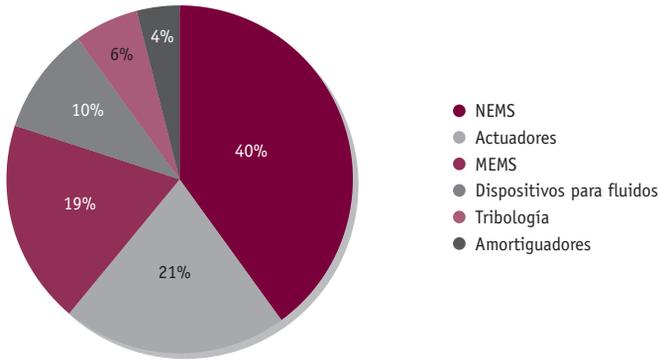
En el eje de abscisas se muestra el número de referencias científicas y en el de ordenadas los nombres de los autores. Sólo aparecen autores con más de 2 publicaciones.

Se observa cómo el número de publicaciones es muy similar en todos los casos. Destacan con 4 publicaciones J.H. Ghen de la Universidad Hunan en China, Y.H. Lee del Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology en Corea y Y.H. Lin del Pacific Northwest National Laboratory en Estados Unidos.

En el [Anexo II Referencias científicas](#) pueden consultarse las referencias científicas publicadas por cada autor.

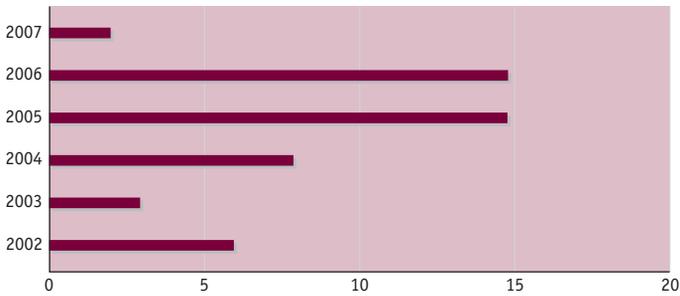
3.1.2.8 Mecánica

En total 49 referencias científicas mencionan la posibilidad de utilizar nanotubos de carbono para distintas aplicaciones mecánicas. El reparto por temas se muestra a continuación:



Se observa cómo el tema que mayor interés científico despierta son los NEMS (Nano ElectroMechanical Systems).

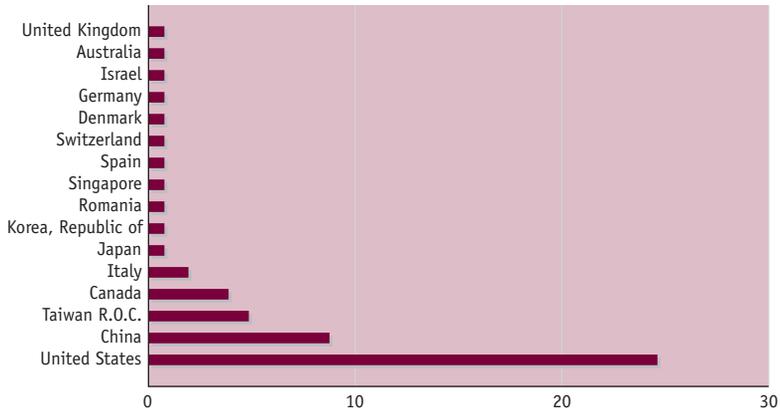
La **evolución anual** de publicaciones sobre este tema se muestra a continuación:



En el eje de abscisas se muestra el número de referencias científicas y en el de ordenadas los años. Los datos del 2007 no son significativos por tratarse del año en curso.

Vemos que en general la tendencia es ascendente, a pesar de la disminución en el número de publicaciones que se produjo en 2003 y de que en 2005 y 2006 el número es el mismo.

Los **países** principales en cuanto a publicaciones sobre mecánica son los siguientes:



En el eje de abscisas se representa el número de referencias científicas y en el de ordenadas los países. Se muestran todos los países aparecidos en las búsquedas sin restricción por número de documentos.

Es muy evidente la diferencia de Estados Unidos respecto al resto de países, lo que demuestra su mayor interés sobre el tema. Le siguen China, Taiwan y Canadá. Como puede verse en el gráfico, España tiene 1 publicación.

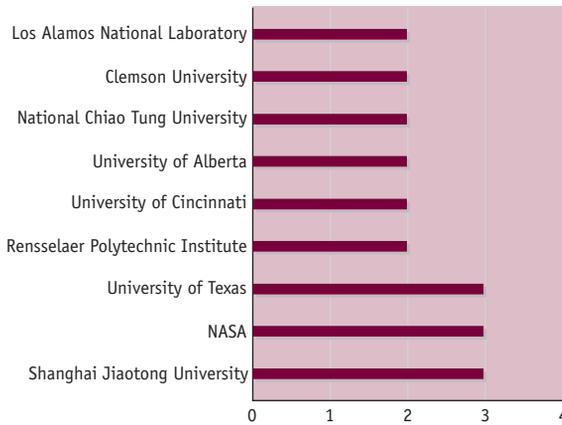
En el [Anexo II Referencias científicas](#) pueden consultarse las referencias científicas publicadas en cada país.

En la siguiente tabla puede verse el número de referencias científicas publicadas en las distintas **regiones** mundiales:

<i>Región</i>	<i>Número de Publicaciones</i>
Norteamérica	29
Asia	18
Europa	8
Australia	1

Norteamérica, con 25 publicaciones en Estados Unidos y 4 en Canadá, es la principal región mundial en cuanto a número de referencias científicas que tratan sobre Mecánica.

Las **instituciones** que más referencias científicas han publicado sobre el tema son:



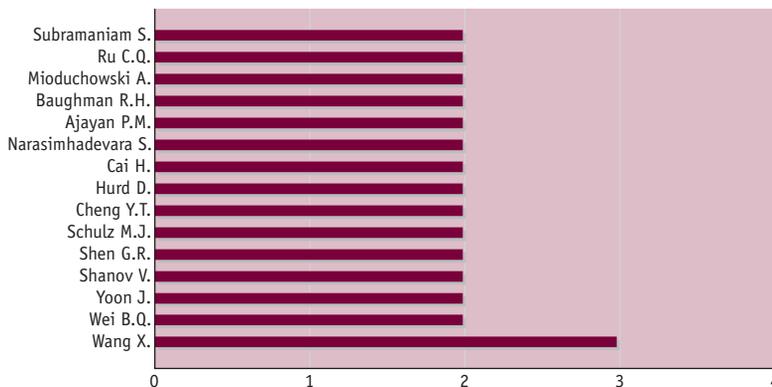
El eje de abscisas representa el número de referencias científicas y el de ordenadas las instituciones. Sólo se muestran instituciones con más de 1 documento.

Destacan con 3 publicaciones la Universidad Shanghai Jiaotong de China, la NASA en Estados Unidos y la Universidad de Texas también en Estados Unidos.

Las publicaciones de la Universidad Shanghai Jiaotong hacen referencia a NEMS en general, a osciladores para NEMS y a actuadores. La NASA trata sobre NEMS en general, resonadores para NEMS y tribología. Las publicaciones de la Universidad de Texas hacen referencia a los actuadores como aplicaciones mecánicas de los nanotubos de carbono.

En el [Anexo II Referencias científicas](#) pueden consultarse las referencias científicas publicadas por cada institución.

Los **autores** que más referencias científicas firman son los siguientes:



El eje de abscisas representa el número de referencias científicas y el de ordenadas los nombres de los autores. Sólo aparecen autores con más de 1 documento.

En este caso sólo hay un autor que destaca sobre los demás con 3 publicaciones. Se trata de X. Wang de la Universidad Shanghai Jiaotong en China.

En el Anexo II Referencias científicas pueden consultarse las referencias científicas publicadas por cada autor.

3.2 Análisis de proyectos

Para conocer las estrategias de búsqueda y las características de las BB.DD. utilizadas para la elaboración de este informe, se pueden consultar el [Anexo I Bases de datos y estrategias de búsqueda](#).

En general se aprecia que los **datos recogidos por las diferentes BB.DD. son muy variados y no siempre comparables**. En algunas BB.DD. (como DoE, R&D) se muestran las diferentes entradas de financiación del proyecto con diferentes fechas a lo largo de la vida del proyecto. En otras, como SBA, se da un único dato de financiación del proyecto y sólo una fecha de inicio de proyecto, sin dato de finalización de proyecto. En otras como NIH CRISP no hay información de financiación. Todas estas diferencias hacen que la suma total de las financiaciones no sean todo lo fiables que se querría. Se ha optado de todas formas por mostrar los gráficos de evolución de la financiación (estas gráficas se han realizado repartiendo todo el coste atribuido al proyecto de manera homogénea entre los años de duración del mismo) pero no se sacarán conclusiones sobre ellos. Además en general se aprecia bastante diferencia en la tipología de proyectos entre Europa y EE.UU. **Los europeos tienen una duración media de unos 3 años** y tienen una estrecha **colaboración entre varias instituciones y/o empresas** (entre 5 y 10 en la mayoría de los casos), mientras que en **EE.UU. casi siempre sólo aparece una única empresa vinculada** a los proyectos en la información a que se tiene acceso y la **duración es en la mayoría de los casos de 1 año**.

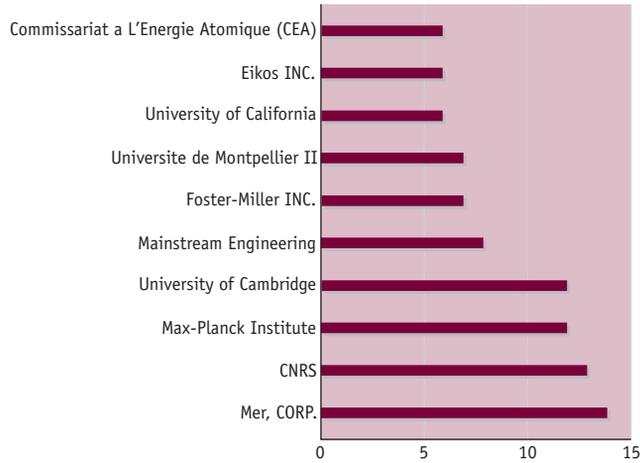
Hay que ser consciente además de que los datos conseguidos **sólo muestran una parte de las iniciativas de los diferentes países**. CORDIS, por ejemplo, recoge información, bastante fiable, de financiación de la CE pero no se tiene información de ninguna iniciativa de los países miembros por separado con lo que la imagen no es completa. Por todo ello se ha optado por hacer un análisis separado de las distintas zonas geográficas dando **más importancia a las tendencias que a los valores absolutos**.

3.2.1 Análisis por zonas geográficas

Se analizan en primer lugar EE.UU. y Europa de forma global. A continuación se hacen análisis específicos para cada una de las dos zonas.

3.2.1.1 Evolución global (EE.UU. + Europa)

Se muestra a continuación una gráfica con las **10 instituciones que más han participado en los proyectos encontrados en la totalidad de BB.DD.**



Gráfica de las 10 instituciones más participativas en los proyectos detectados.

La empresa que más proyectos ha desarrollado es Materials and Electrochemical Research corporation (MER, Corp.), situada e Arizona, EE.UU. En los 14 proyectos de esta empresa detectados ha abordado varias aplicaciones diferentes. La mayor concentración de proyectos se encuentra en la síntesis de CNT (SWNT y DWNT principalmente) a lo largo de los años 2000 y 2001. Su segundo foco han sido los materiales con propiedades mecánicas mejoradas, aunque también alguno con propiedades eléctricas pensando en recubrimientos para evitar interferencias electromagnéticas en aplicaciones aeroespaciales, aplicaciones a las que se ha dedicado entre el 2000 y 2005. Otro foco de interés ha sido el desarrollo de nanotubos como emisores de electrones, trabajo en el que también se centró en el 2001. También ha tenido alguna incursión en los sensores (2003) y en el almacenamiento de información (1997).

<i>Temática</i>	<i>Año</i>
Memorias	1997
Materiales	2000, 2002, 2005
Emisión de campo	2001
Cátodos pilas litio	2001
Síntesis de CNT	2001, 2002
Sensores	2003

La segunda institución es el Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) francés. De los 13 proyectos detectados en que ha participado el mayor peso lo llevan el estudio de propiedades de los CNT desde 1991 y hasta el presente en un proyecto que se inició en el 2004. Otros temas en los que ha desarrollado algún proyecto es en: síntesis de CNT (2000), funcionalización (2000), pantallas planas (2000 y 2004) Materiales inteligentes (2005), FET (2005) y sensores de fuerza (2006).

<i>Temática</i>	<i>Año</i>
Propiedades CNT	1991, 1995, 1996, 2000, 2004
Síntesis de CNT	2000
Funcionalización	2000
Pantallas planas	2000, 2004
Materiales inteligentes	2005
Sensores de fuerza	2006

La siguiente institución es el Max Plank Institute alemán. De los 12 proyectos que se han detectado sus intereses varían desde el estudio de las propiedades de los CNT, hasta el control de la orientación de los CNT necesarios en muchas aplicaciones pasando por estudios de síntesis, de generación de materiales con propiedades mejoradas, llegando a las pantallas planas y a las células solares.

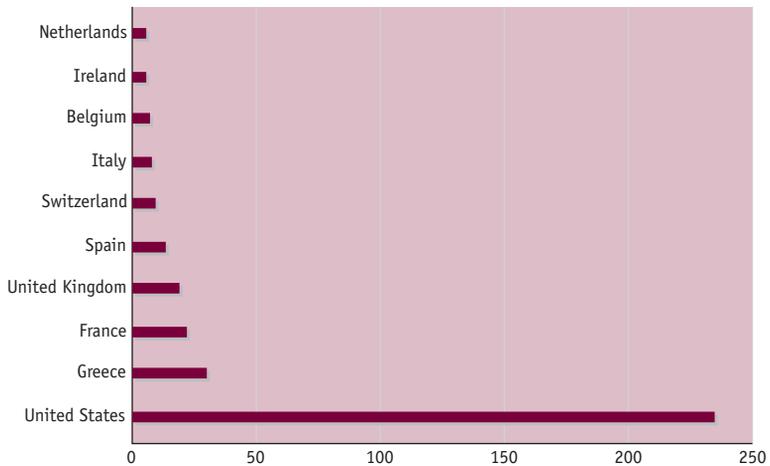
<i>Temática</i>	<i>Año</i>
Propiedades CNT	1991, 1996
Funcionalización	2000
Materiales	2000, 2001
Síntesis de CNT	2000, 2004
Sensores	2001
Interconectores	2001
Pantallas planas	2002
Células solares	2004
Control de orientación de CNT	2005

Como última institución a particularizar está la Universidad de Cambridge, del Reino Unido, que, en los 12 proyectos que se han detectado de esta institución, también muestra intereses muy variados como se muestra en la tabla siguiente:

<i>Temática</i>	<i>Año inicio</i>
Síntesis de CNT	2000, 2002, 2004
Materiales	2001
Pantallas planas	2001
Amplificadores de microondas	2002
Propiedades de los CNT	2002
Caracterización	2005
Dispositivos electrónicos	2005
Fet	2005
Roadmap de aplicaciones CNT	2006

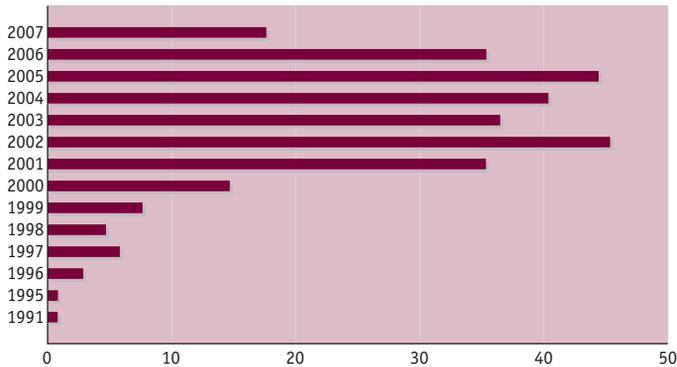
Como se ve del análisis general de las instituciones con más esfuerzo en desarrollo de proyectos en aplicaciones de CNT los intereses de cada institución no son únicos y parecen estar atacando diversos frentes a la vez. En todas ellas aparecen como punto común proyectos en los que se pretende estudiar propiedades y comportamientos de los CNT, ya que aún quedan muchas incógnitas que desvelar sobre esto. También se ve que **todos ellos muestran interés en los materiales y en la electrónica**, que se podrían considerar como las aplicaciones estrella.

Cabe destacar, por su vinculación con el presente informe, el proyecto de **obtención de un “roadmap” de aplicaciones de los CNT (proyecto denominado ARCORC) y que finaliza en septiembre de 2007** en el que participa la Universidad de Cambridge. **Se recomienda estar atento a las posibles publicaciones que se realicen vinculadas a este proyecto** ya que puede aportar nuevas informaciones sobre las aplicaciones de los CNT y sus necesidades de investigación.



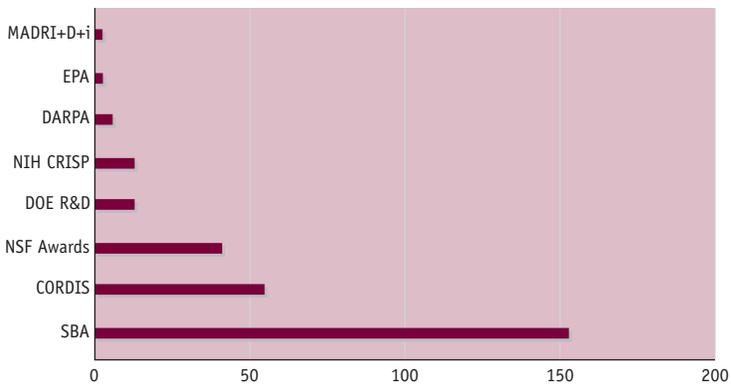
Gráfica de los países que participan en más proyectos.

El gráfico anterior muestra los proyectos localizados según los diferentes países. Hay que ser cautelosos a la hora de analizar los resultados ya que los datos de EE.UU. y de Europa se han conseguido de bases de datos diferentes y por tanto no son comparables. Con lo que se considera que la diferencia que muestra el gráfico de EE.UU. frente a Europa puede no reflejar la realidad. Por el contrario la comparación entre países Europeos sí que se considera válida (todos los datos se han obtenido de CORDIS). Se aprecia que dominan Alemania y Francia, mientras **España ocupa la cuarta posición dentro de Europa**.



Gráfica de la evolución de la totalidad de proyectos detectados.

En cuanto a la evolución de proyectos a lo largo de los años se aprecia una evolución creciente desde el año de descubrimiento de los CNT (1991). El bajón que se aprecia después del 2005 es achacable a la no actualización en tiempo real de los datos en las Bases de Datos, por otro lado el pequeño descenso del número de proyectos entre 2002 y 2005 se puede deber a muchas causas difícilmente analizables desde este punto como puede ser impulsos de financiaciones en años puntuales debido a una estrategia preestablecida por los gobiernos, etc. Con estos datos **se considera que el interés en estos temas sigue siendo creciente.**

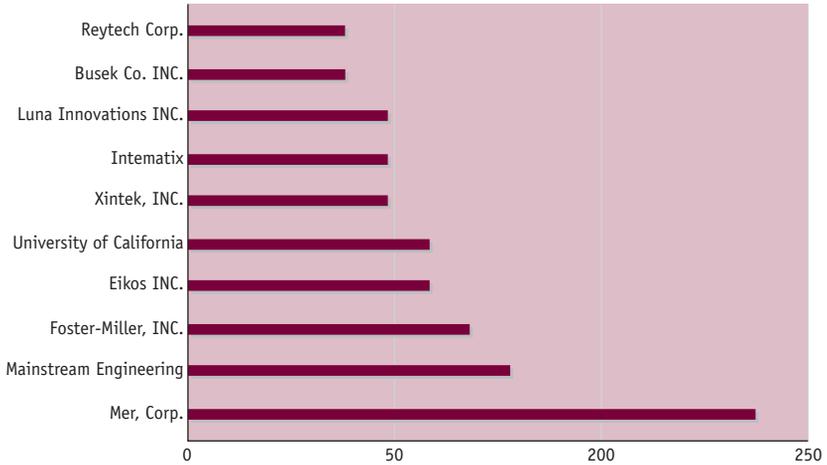


Gráfica de los resultados obtenidos según las BB.DD. utilizadas.

Se muestra finalmente el reparto de proyectos localizados por BB.DD. Los detectados en **SBA, NSF Awards, DoE R&D, NIH CRISP y EPA hacen referencia únicamente a EE.UU.**, mientras que **CORDIS recoge información de participaciones en los Programas Marco de la CE y Madri+d recoge de manera bastante limitada los proyectos españoles.**

3.2.1.2 EE.UU.

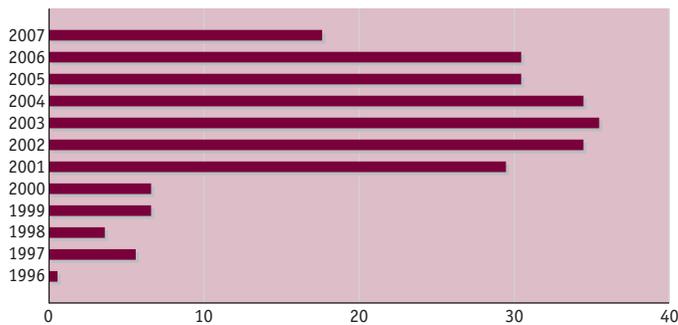
Se muestra a continuación las empresas que más han aparecido en las búsquedas en las BB.DD. que hacen referencia a EE.UU.



Empresas que más participan en proyectos en EE.UU.

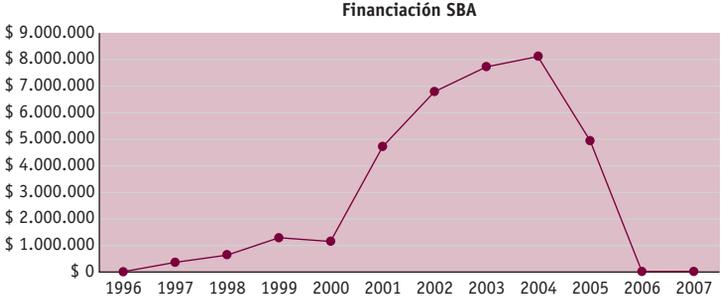
La más destacada es MER Corporation cuyos intereses ya se han desglosado en el apartado anterior. En segundo lugar, a bastante distancia, Se encuentra Mainstream Engineering. Sus proyectos se han realizado entre 2003 y 2004 y han versado sobre **materiales con aplicaciones térmicas, almacenamiento de energía en baterías de Litio y en supercapacitores, y sensores de gases y materiales nocivos.**

En tercer lugar aparece la empresa americana Fostermiller, Inc., sus proyectos se han detectado entre los años 2002 y 2004 con intereses en búsqueda de un material con **radiación de cuerpo negro, estudio de composites con propiedades mecánicas mejoradas para aplicaciones espaciales y de defensa, recubrimiento para evitar interferencias Electromagnéticas, humos para camuflaje IR y simulación y estudio de redes neuronales.**



Evolución de la totalidad de proyectos en EE.UU.

Esta evolución no muestra grandes diferencias respecto a la evolución total de proyectos mencionada más arriba por lo que no añade nada nuevo.

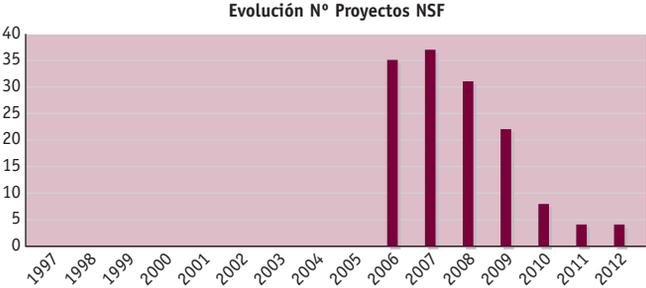


Evolución de la financiación según los proyectos detectados en la SBA

La evolución de la SBA, que da información de iniciativas denominadas “small business” (pequeño negocio), es claramente creciente hasta el año 2005 en que se aprecia un bajón importante. Se considera la causa de este bajón una posible no actualización de datos en la SBA, que se demuestra con la no detección de proyectos en el 2006. En esta B.D.D. no hay información de fecha de fin de proyectos por lo que se ha considerado que los proyectos financiados tienen una duración de un año; esto explica porqué no hay información más allá del 2005.

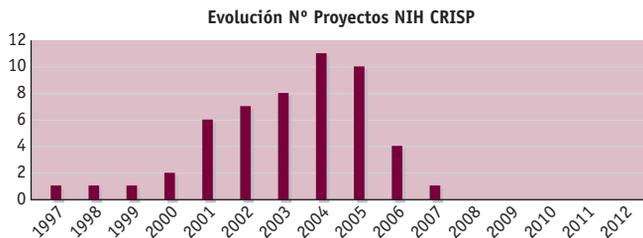


Evolución de la financiación según los proyectos detectados en la NSF



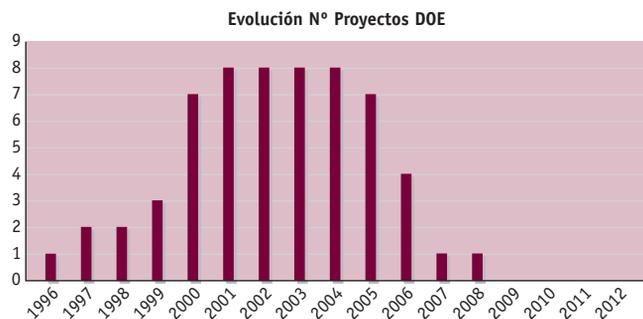
Evolución del número de proyectos encontrados en la NSF.

La National Science Foundation (NSF) ofrece información de proyectos de **ciencia básica** financiados a las universidades. Se desconoce la razón por la que no se detectan proyectos hasta el 2006 y no se puede hacer ninguna valoración de evolución.



Evolución del número de proyectos encontrados en la NIH CRISP.

La NIH CRISP ofrece información sobre proyectos **biomédicos**. Esta gráfica de la NIH CRISP muestra una evolución creciente hasta 2004 y prácticamente mantiene valores en el 2005. Nuevamente los proyectos tienen una duración típica de un año por lo que no hay información más allá del presente año. No hay datos de financiación.



Evolución del número de proyectos encontrados en la DOE R&D.

Los proyectos mostrados por esta página hacen referencia a **energías**. Esta gráfica de la DOE R&D muestra la evolución de proyectos sobre energía. Se aprecia una constancia en el número de proyectos entre el 2001 al 2005.

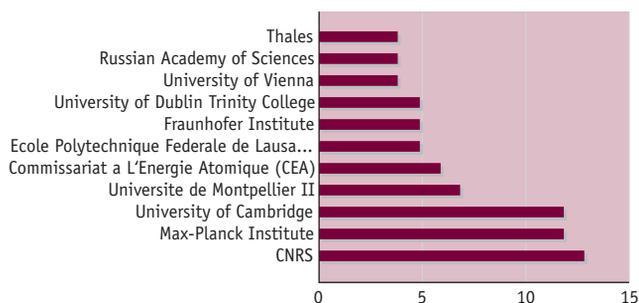


Evolución de la financiación según los proyectos detectados en DOE R&D.

Se aprecia una financiación muy constante en los años 2003-2006.

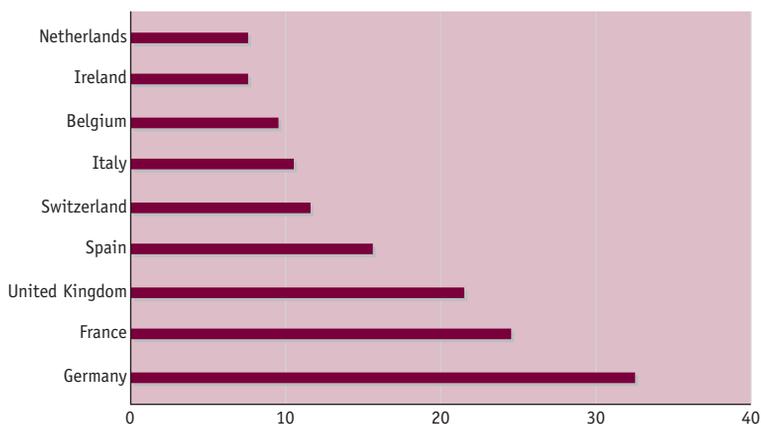
3.2.1.3 Europa

Se muestra a continuación las empresas que más han aparecido en las búsquedas en CORDIS y que, por tanto, reflejan la **participación de los diferentes países europeos en los proyectos de los diferentes Programas Marco de la CE.**



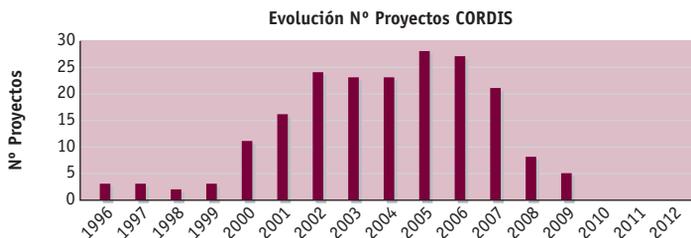
Empresas que más participan en proyectos en Europa

Las tres instituciones con más publicaciones ya han sido comentadas en el apartado general.



Gráfica de los países que participan en más proyectos en Europa

Se tiene aquí un detalle de la participación en proyectos por países. A destacar el **cuarto puesto español** en participación en proyectos.



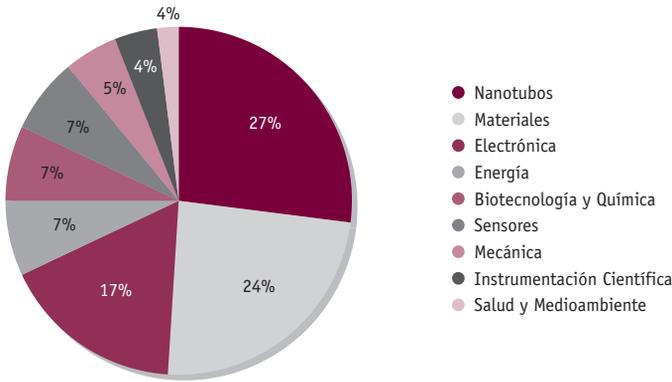
Evolución de la totalidad de proyectos detectados en Europa

Esta gráfica muestra la evolución del número de proyectos en curso (no el año de inicio) a lo largo de los años (por eso hay datos de más allá del 2007). La evolución es creciente hasta el 2005 y en el 2006 prácticamente se encuentra al mismo nivel a pesar que seguramente no estarán actualizados todos los proyectos, con lo que se espera que siga la tendencia al alza, más si cabe teniendo en cuenta que en 2007 se ha dado inicio al VII Programa Marco de la CE con un tema dedicado exclusivamente a **“Nanociencias, nanotecnologías, materiales y tecnologías de producción”** donde deben estar incluidos muchos de los proyectos relacionados con CNT y sus aplicaciones, aunque está claro, como se ha visto a lo largo de este informe, que también pueden aparecer proyectos de aplicaciones CNT directamente en otros temas del VII PM como Energía, Salud, Biotecnología, etc.

3.2.2 Análisis temático

Como se ha comentado al inicio en la búsqueda de proyectos se ha sido menos restrictivo que en la de referencias científicas, esto es debido a que el volumen de proyectos es menor y las sentencias de búsqueda se tomaron menos limitativas. En concreto para este apartado se ha utilizado la sentencia:

(“carbon nanotube” or “carbon nanotubes” OR CNT OR SWNT OR DWNT OR MWNT OR SWCNT OR DWCNT OR MWCNT)



Reparto de la totalidad de proyectos por temáticas generales

Esta gráfica resume el reparto entre las diferentes áreas de interés que se han detectado en las búsquedas.

En el apartado **“Nanotubos”** se recogen proyectos en los que el interés se centra en las **propiedades y comportamiento de los nanotubos en sí** y no en aplicaciones directas. Se trata de proyectos que pretenden profundizar más en el conocimiento de los nanotubos y sobre los que se irán basando otros proyectos de aplicación.

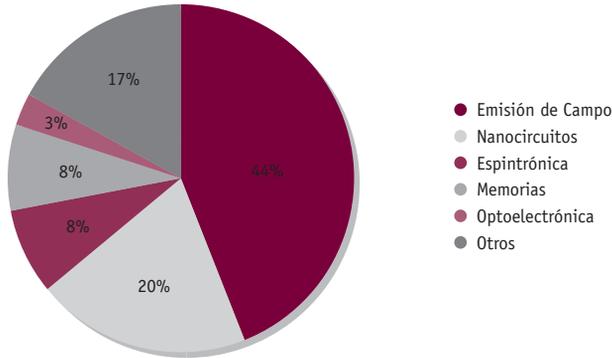
En el apartado **“materiales”** están los proyectos en los que el fin no es una aplicación en sí sino la obtención de un **material con propiedades mejoradas** (que después podrán ser aprovechadas para varias aplicaciones diferentes). No es de extrañar que destaque este apartado ya que en muchos casos **se solapa con otras aplicaciones** particulares.

Como aplicación claramente particularizada **destaca la electrónica**, le siguen con algo menos de volumen **energía, biotecnología y química** (donde entre otros se recogen aplicaciones en **medicina**), **sensores, mecánica e instrumentación científica** (donde prácticamente todos los resultados son de nanotubos utilizados como puntas para microscopios de sonda de barrido) y, por último, aparece el apartado de **“Salud y medioambiente”** que recoge proyectos en los que se quiere evaluar los problemas que pueden causar los CNT a los usuarios y al entorno.

En las próximas páginas se particulariza el estudio sobre cada uno de estos apartados.

3.2.2.1 Electrónica

En la siguiente gráfica se aprecia en qué partes de la electrónica se están desarrollando más proyectos.



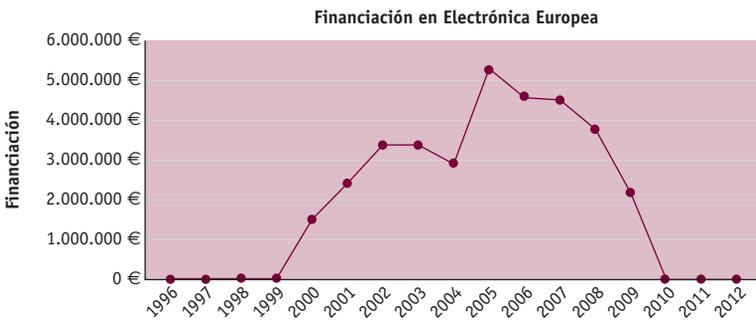
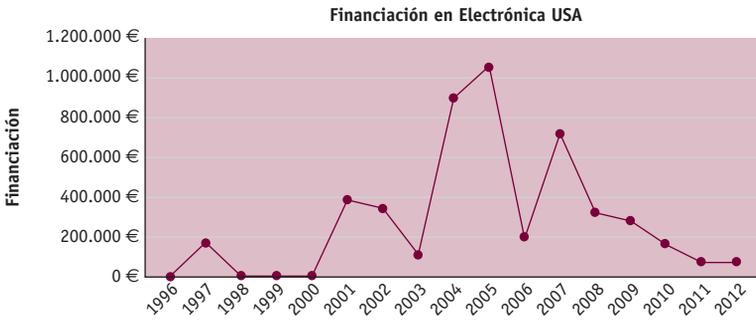
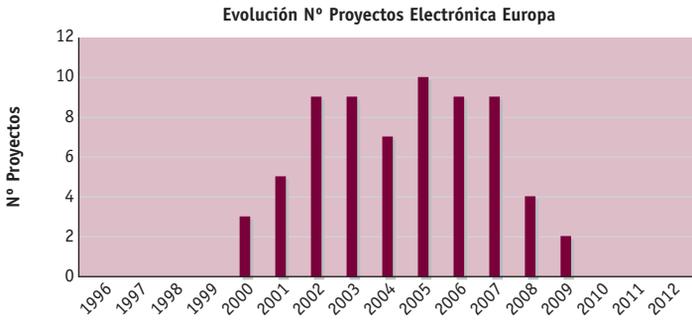
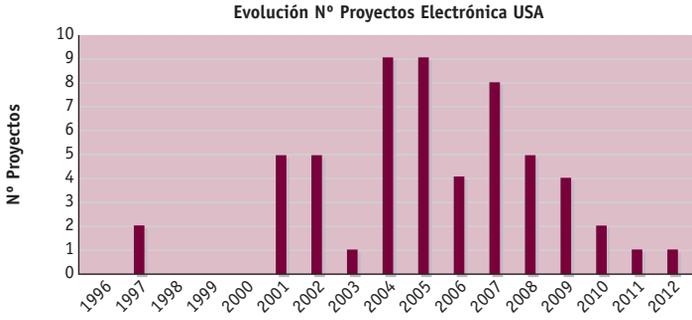
Reparto de los proyectos de electrónica por temática

El peso **en electrónica** recae en los **dispositivos de emisión de campo**; dentro de estos se pueden destacar las **pantallas planas**, los **amplificadores de potencia** y los sistemas de **propulsión eléctrica en el espacio**.

Dentro del subapartado **“Nanocircuitos”** destacan sobre todo **transistores** (y sobre todo dentro de ellos los FET) e **interconectores**.

Los otros subapartados que también destacan son la **espintrónica**, los dispositivos de **almacenamiento de datos** y la **optoelectrónica**.

Se muestra a continuación una comparativa de la evolución del número de proyectos y de financiación en electrónica en EE.UU. y en Europa. Parece que la evolución de Europa es algo más continua, sin los altibajos que muestra la de EE.UU.



Comparativa de evolución de proyectos sobre electrónica y su financiación entre Europa y EE.UU.

Las instituciones que aparecen en más proyectos en temas relacionados con electrónica son:

<i>Empresa</i>	<i>Nº Proyectos</i>
University Of Cambridge	7
Xintek, INC.	4
Busek CO. INC.	4
Commissariat a L'energie Atomique (CEA)	4

Como ya se ha comentado antes la Universidad de Cambridge, del Reino Unido, ha mostrado interés en desarrollo de **FET**, en **pantallas planas**, en **amplificadores de microondas**, basados en emisión de campo y en la obtención de dispositivos electrónicos.

La empresa americana Xintec, Inc., ubicada en Carolina del Norte, ha mostrado interés en un sistema de **propulsión para dispositivos espaciales** basado en emisión de campo, **amplificadores de microondas**, mejoras de **microscopios electrónicos** y en un sistema de **imagen médica por rayos X**.

La empresa Busek Co. está especializada en **propulsión eléctrica espacial** y en ello ha centrado sus esfuerzos con tres proyectos sobre propulsión aprovechando la emisión de campo. También aparece en un proyecto sobre un **refrigerante** que aprovecha también la emisión de campo.

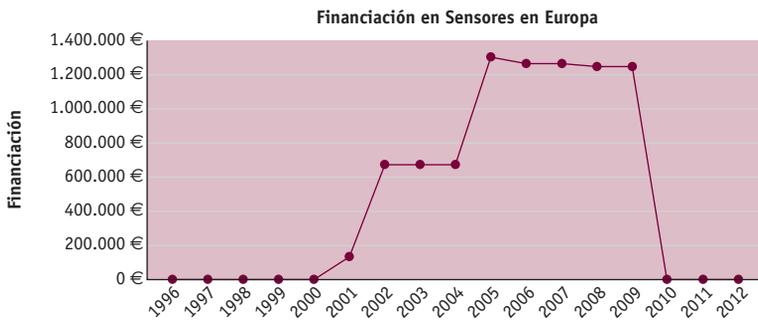
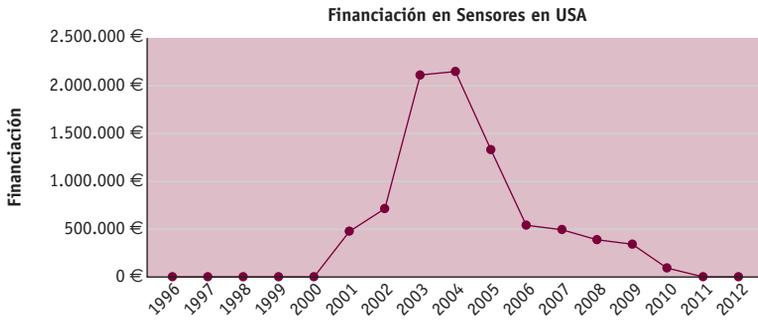
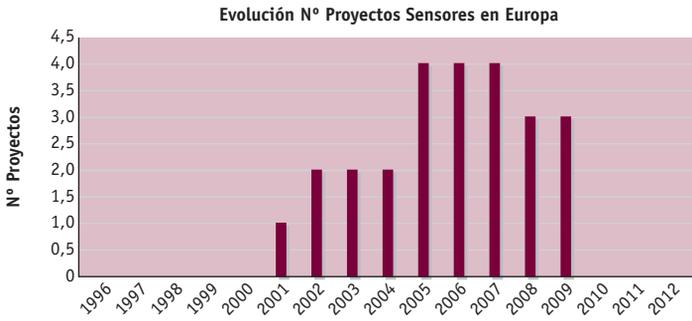
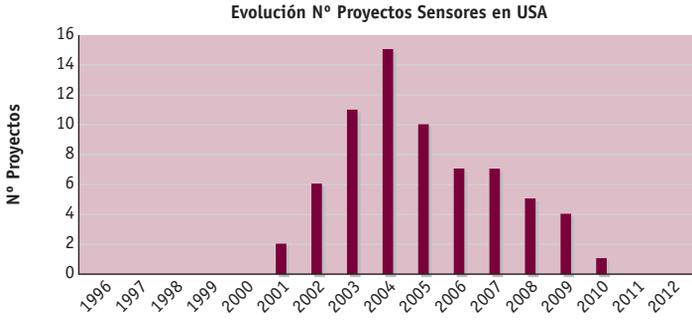
El Commissariat a l'énergie atomique (CEA) francés, ha mostrado su interés por las **pantallas planas** con tres proyectos sobre este tema en concreto. Un cuarto proyecto versa sobre electrónica en general.

3.2.2.2 Sensores

Dentro del apartado de sensores han aparecido entre otros sensores **biológicos**, **mecánicos**, **químicos**, **electromagnéticos**, **ópticos**, materiales multifuncionales que pueden funcionar como **pieles inteligentes**, etc.

Ninguno destaca sobre los otros, de todos se han detectado unos pocos proyectos. Quizá los **sensores biológicos** son los que más han aparecido en aplicaciones de **detección de mutaciones en la lucha contra el cáncer** o en aplicaciones de **análisis de sangre o saliva**.

La evolución de Europa y EE.UU. es bastante diferente, se aprecian bastantes más proyectos en EE.UU. y la financiación en los años 2003-5 parece haberse incrementado.



Comparativa de evolución de proyectos sobre sensores y su financiación entre Europa y EE.UU.

Las instituciones con mayor número de apariciones en proyectos son las que se muestran en la tabla adjunta:

<i>Empresa</i>	<i>Nº Proyectos</i>
Nanomix, INC.	3
Molecular Nanosystems, INC.	3
Mainstream Engineering	2
Maxplanck Institute	2
CNRS	2
Emitech, INC.	2

La empresa Nanomix, Inc. está ubicada en California y se dedica a medición y detección de parámetros médicos. Ha participado en proyectos en desarrollo de un **sensor de capnografía** (evolución del CO₂ en sangre), desarrollo de un **sensor de contaminantes en el aire** y un proyecto más genérico de desarrollo de **FET para su uso como sensores**.

La empresa también californiana Molecular Nanosystems, Inc. trabaja en el desarrollo de dispositivos electrónicos basados en Nanoelectrónica. Ha participado en proyectos que tratan **sensores para análisis de sangre o saliva**, así como también en el desarrollo de un **sensor de presión**.

En tercer lugar aparece Mainstream Engineering, que como ya se ha comentado ha participado en el desarrollo de **sensores de gases y de productos químicos en agua**.

El Max Plank Institute alemán, ha participado en un proyecto de **medición de parámetros atmosféricos**.

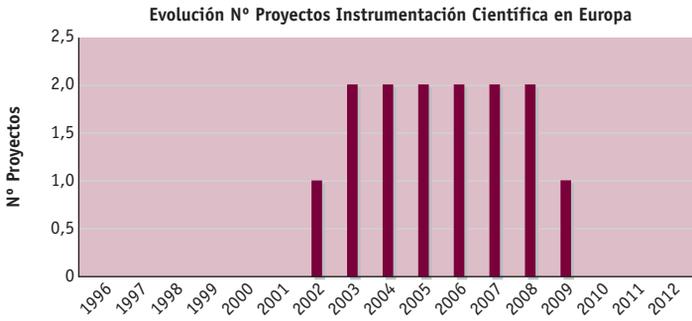
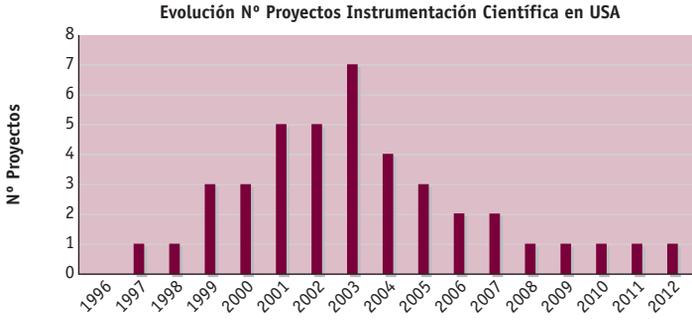
El Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) francés, ha investigado en el desarrollo de un **sensor de fuerzas** a escala nanométrica y en el desarrollo de **superficies inteligentes** con capacidad de sensor y actuador.

Por último la empresa americana Emitech, Inc. ubicada en Massachussets ha participado en un proyecto de desarrollo de **materiales inteligentes** con capacidad de ser sensores y actuadores y en otro de **sensor de IR**.

3.2.2.3 Instrumentación científica

Todo lo que ha aparecido en este apartado trata sobre la **utilización de CNT como puntas de microscopios** para mejorar su resolución, en la mayoría de los casos para **imagen** aunque también hay algún caso de **nanomanipulación**.

Al analizar la evolución de EE.UU. y Europa, se aprecia un dominio en este tema en EE.UU., mientras que apenas si se han detectado 4 proyectos en Europa.



Comparativa de evolución de proyectos sobre instrumentación científica y su financiación entre Europa y EE.UU.

Las empresas que más han sobresalido, las únicas que han desarrollado más de un proyecto, en este apartado son:

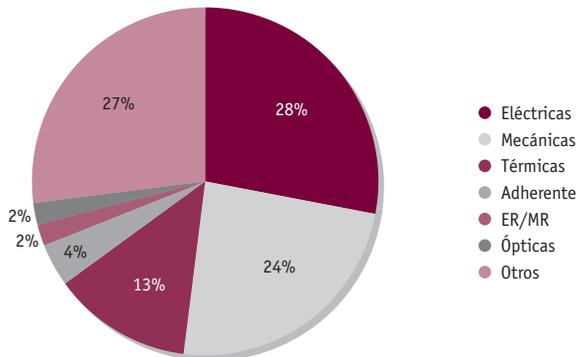
<i>Empresa</i>	<i>Nº Proyectos</i>
Harvard University	2
Nascatec GMBH	2
Xidex CORP.	2

La empresa alemana, Nascatec GMBH ubicada en Stuttgart **se dedica a fabricar dispositivos para visualizar y manipular elementos a escala nanométrica**. Los proyectos en los que ha participado pretenden desarrollar **instrumentación que ayude a manipular a escala nanométrica**.

La empresa americana de Texas, Xidex Corp., **desarrolla microscopios AFM con CNT como puntas**. Es un mercado muy reciente, **en verano del año pasado sacó sus primeras unidades Beta al mercado**.

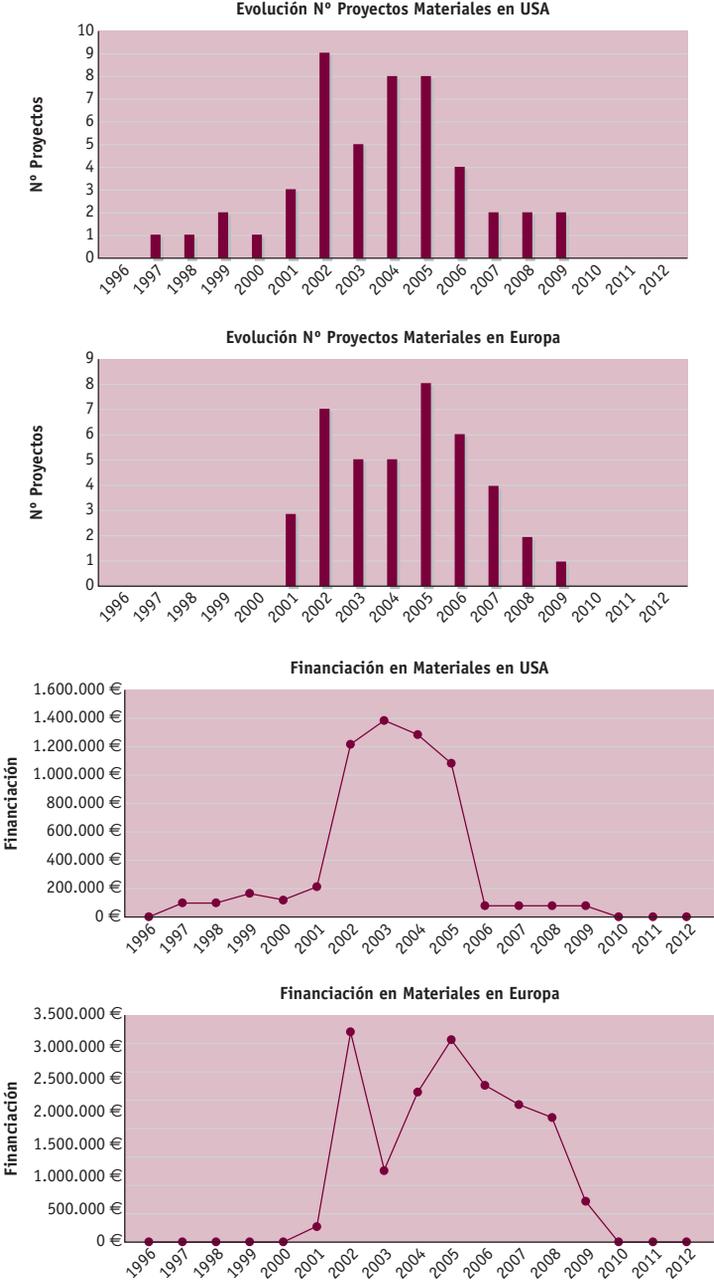
3.2.2.4 Materiales

En la gráfica siguiente se pueden distinguir los tipos de proyectos en función de las propiedades de los compuestos que mejoran con CNT. Las **propiedades eléctricas son las más estudiadas**, dato que está de acuerdo con el interés que ya se ha visto que hay en electrónica; las **propiedades mecánicas** son las siguientes más estudiadas **sobre todo vinculadas con el sector aeroespacial**. Otros temas sobre los que también se busca mejora son propiedades **térmicas**, ópticas, materiales adherentes, propiedades **magnetorresistivas (MR) y Electrorresistivas (ER)**, etc. En el apartado otros se han incluido proyectos que buscan mejoras de materiales de una manera generalizada, sin incidir en una propiedad en concreto.



Reparto de los proyectos de materiales por temática.

La evolución se muestra en las gráficas siguientes. EE.UU. empezó antes a investigar sobre estos temas pero parece que en la actualidad se ha igualado bastante la participación en proyectos. La financiación parece que está siendo mayor en Europa, pero los datos no pueden ser concluyentes.



Comparativa de evolución de proyectos sobre materiales y su financiación entre Europa y EE.UU.

Se muestra a continuación las empresas de las que se han obtenido más de 3 participaciones en proyectos:

<i>Empresa</i>	<i>Nº Proyectos</i>
Eikos INC.	6
Luna Innovations INC.	4
Maxplanck Institute	4
Mer, CORP.	4

Eikos, Inc. es una empresa americana ubicada en Massachussets **dedicada a la fabricación de recubrimientos que contienen CNT**. Todos los proyectos que se han detectado con participación de Eikos versan sobre **recubrimientos para proteger contra las interferencias electromagnéticas**.

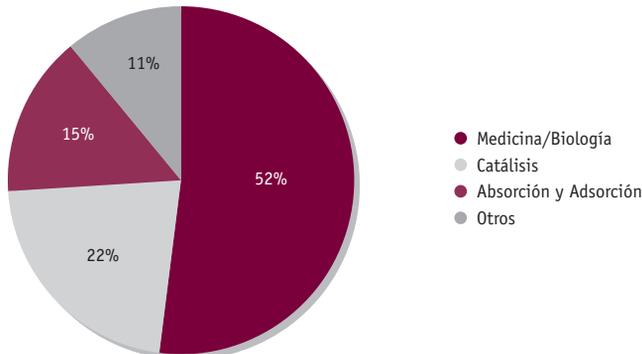
La empresa **Luna Innovations, Inc.** **desarrolla materiales avanzados** en múltiples aplicaciones. Entre los proyectos en que ha participado también destacan los de **protección de interferencias Electromagnéticas**, además de realización de materiales con **propiedades térmicas y eléctricas mejoradas y pieles inteligentes**.

El **Max Plank Institute** alemán, también destaca en este apartado. Sus proyectos tratan sobre la consecución de **materiales reforzados con CNT de una manera general**, sin centrarse en una sola aplicación ni en la mejora de una sola propiedad.

La empresa americana **Materials and Electrochemical Research corporation (MER, Corp.)**, ha investigado materiales con **propiedades antibala, mecánicas, protección de interferencia electromagnética y refuerzos en cerámicas**.

3.2.2.5 Biotecnología y química

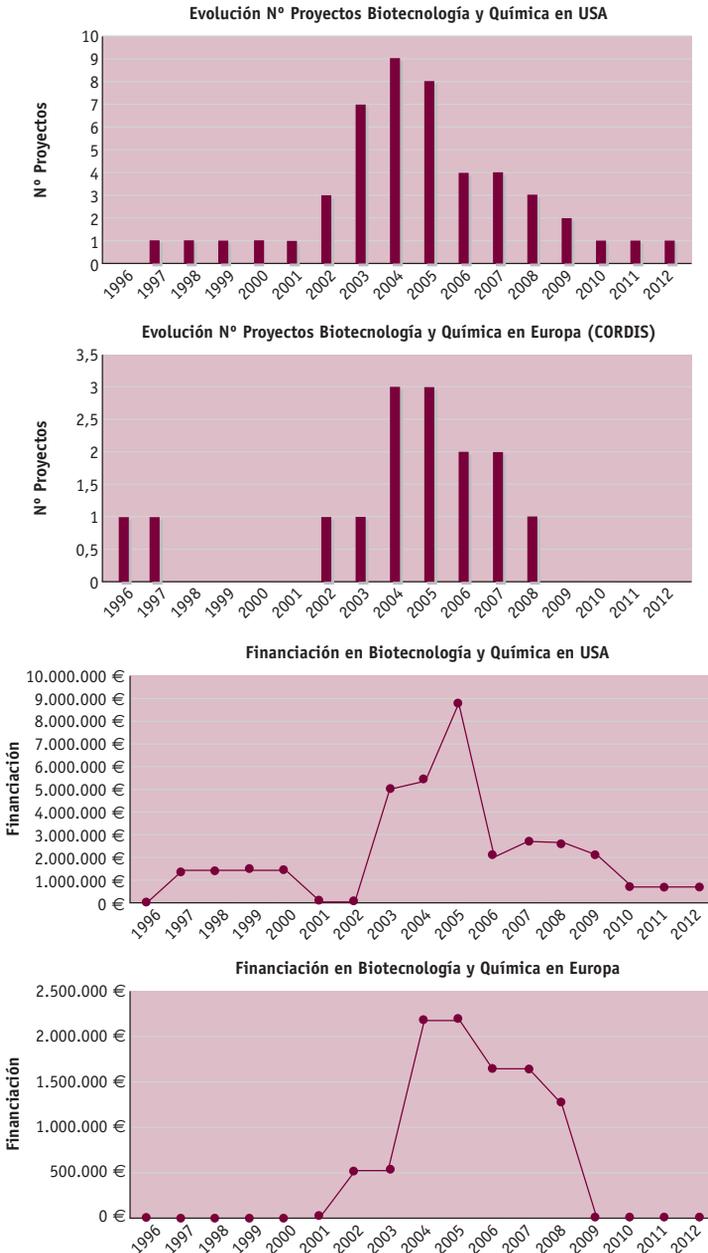
En este apartado se recogen todos los proyectos que tienen que ver con la química y las ciencias de la vida (incluidas la **medina** y la **farmacia**).



Reparto de los proyectos de biotecnología y química por temática

Se aprecia en el gráfico anterior que las aplicaciones en **medicina y biología** son más de la mitad de los proyectos detectados.

Comparando la evolución de EE.UU. y Europa se aprecia que el interés se inició por igual en 1996 pero después en Europa hay un paréntesis de cuatro años sin proyectos y después se ha retomado tímidamente el tema a partir del 2002. Se puede ver también que el número de proyectos americanos detectados es mayor.



Comparativa de evolución de proyectos sobre biotecnología y química y su financiación entre Europa y EE.UU.

Se muestra a continuación una tabla resumen de todas las empresas o instituciones que han aparecido en más de un proyecto:

<i>Empresa</i>	<i>Nº Proyectos</i>
Fostermiller, INC.	2
Molecular Nanosystems, INC.	2
National Renewable Energy Laboratory	2
Maxplanck Institute	2
Universite De Montpellier II	2
University Of Arkansas	2
University Of Cambridge	2

La empresa Fostermiller, Inc. de Massachussets es una **ingeniería de I+D**. En los proyectos que se han hallado participa en la **estimulación neuronal con electrodos con CNT**.

La empresa americana Molecular Nanosystems, Inc. también entra en este campo con los sensores utilizados para **analizar sangre y saliva** ya comentados previamente.

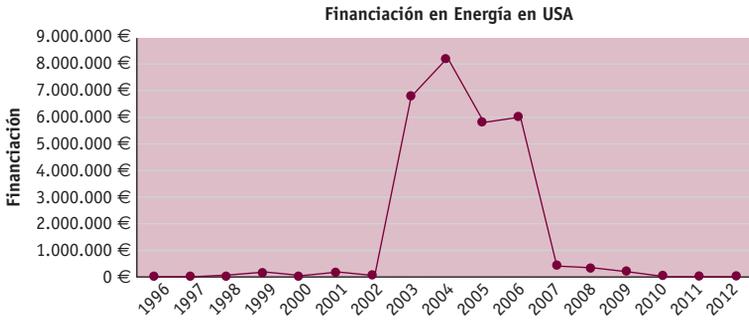
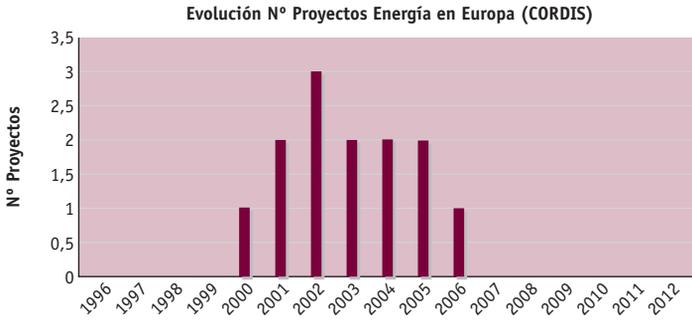
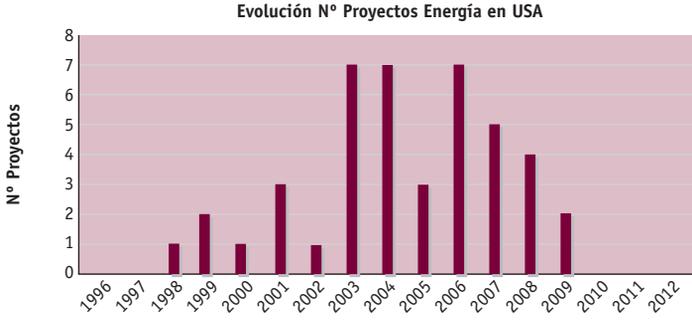
El laboratorio americano National Renewable Energy Laboratory (NREL) siendo el **primer laboratorio de EE.UU. destinado a temas de energías renovables** ha participado en proyectos sobre **absorbentes de CO₂ para purificar tanto hidrógeno como gas natural**.

El Max Plank Institute alemán, también aparece en este apartado con proyectos bastante generales en los que una de sus aplicaciones es la **catálisis**. En estos dos proyectos ha colaborado, entre otros también con la Universidad de Montpellier II, y con la Universidad de Cambridge.

Por último la Universidad de Arkansas, también ha participado en dos proyectos en este apartado sobre la **interacción de nanopartículas, nanotubos entre ellos, con células** pensando en aplicaciones de **suministro de medicamentos** y también en estudiar las **interacciones entre los CNT y el ADN**.

3.2.2.6 Energía

Las aplicaciones que más se han detectado en el apartado de energía son, por orden de cantidad de proyectos localizados: **pilas de combustible** (incluyendo el **almacenamiento de hidrógeno**), **Baterías de Ión Litio**, **Supercapacitores** y **células solares**.



Comparativa de evolución de proyectos sobre energía y su financiación entre Europa y EE.UU.

Las empresas que aparecen con más de un proyecto sobre CNT en energías son:

<i>Empresa</i>	<i>Nº Proyectos</i>
Mainstream Engineering	3
Maxplanck Institute	2
Shanghai Yangtze Nanomaterials	2
University Of Cambridge	2
University Of Wisconsinmilwaukee	2
Idaho National Laboratory	2
Metamateria Partners LLC	2

La empresa Mainstream Engineering centra sus estudios en este apartado en electrodos de CNT para **baterías de Ión Litio** y en el desarrollo de **supercapacitores**.

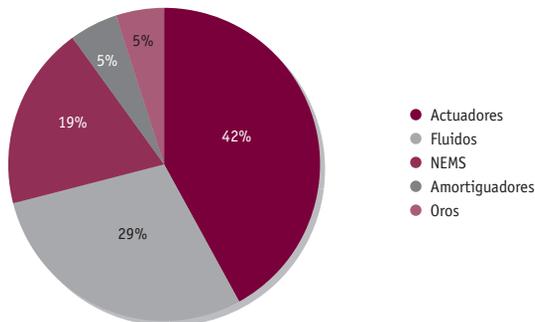
El Max Plank Institute, participa en dos proyectos, uno muy genérico que trata las **pilas de combustible** como una de las múltiples líneas del proyecto y, en el otro desarrollan un **sistema de síntesis de CNT apto para aplicaciones en células solares**. En estos dos proyectos ha participado junto a la Shanghai Yangtze nanomaterials, Co. de China, dentro de colaboraciones en proyectos europeos.

También la Universidad de Cambridge, participa en este apartado de energía en proyectos genéricos que tienen alguna línea en **pilas de combustible** y **supercapacitores**.

La Universidad de Wisconsin-Milwaukee investiga en **aerogeles** en bastantes aplicaciones en energía y en otro proyecto en desarrollo de **materiales reforzados con CNT para obtención de células fotovoltaicas mejoradas**.

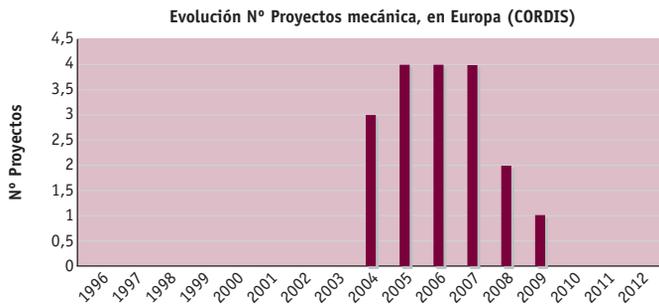
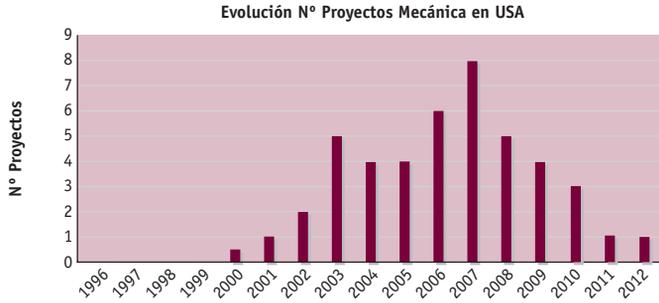
3.2.2.7 Mecánica

Destacan dentro del apartado de mecánica las aplicaciones en **actuadores**, en **dispositivos para fluidos** y en **NEMS** donde desempeñan funciones tanto de sensores como de actuadores en la nanoescala.



Reparto de los proyectos de mecánica por temática.

A continuación se muestra la evolución de los proyectos relativos a mecánica y su financiación tanto para el caso europeo como para el americano.



Comparativa de evolución de proyectos sobre mecánica y su financiación entre Europa y EE.UU.

Sólo las dos instituciones que se muestran a continuación han participado en más de un proyecto:

<i>Empresa</i>	<i>Nº Proyectos</i>
Seldon Laboratories, LLC,	2
University Of California	2

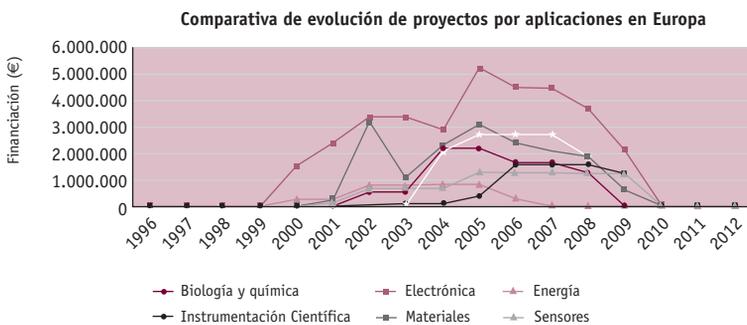
La empresa americana Seldon Laboratories, LLC localizada en Vermont, ha **desarrollado un producto basado en nanotecnología, ya a la venta, para depuración de fluidos**. Los proyectos que se han detectado van también en esta línea. Uno habla de **depuración de agua**, y el otro de **filtro de agentes químicos y biológicos** para situaciones de guerra o terrorismo.

La universidad de California colabora con dos de sus sedes, la de Berkeley y la de Davis, se trata de un proyecto de estudio de **transporte de líquidos en CNT**.

COMPARATIVA DE APLICACIONES

Hasta aquí se han visto los puntos más destacados de cada una de las aplicaciones de nanotubos de carbono que han aparecido en las diferentes bases de datos y se han comentado los puntos y los actores más destacados en cada una de las aplicaciones. Ahora puede resultar interesante **comparar la evolución de todas ellas en un mismo gráfico con fin de ver la evolución relativa del interés**.

COMPARATIVA EUROPA



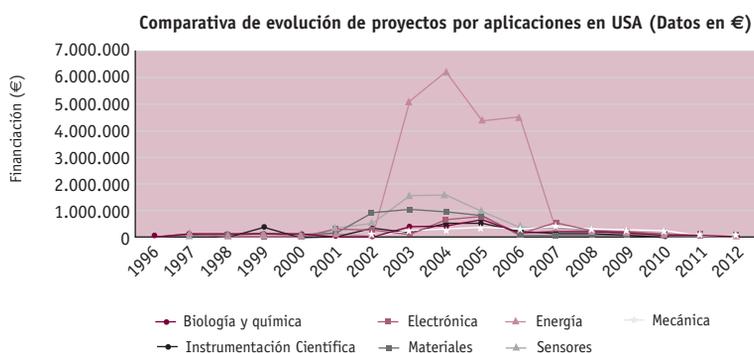
Gráfica comparativa de la financiación para las diferentes aplicaciones genéricas en Europa

La evolución en Europa es la que se muestra en la grafica superior, se aprecia que la **electrónica es la aplicación general en la que desde el principio se está dedicando más financiación**. La tendencia sigue siendo al alza teniendo en cuenta que los datos

del 2006 y del 2007 aún están por actualizar (sobre el 2007, con las nuevas “calls” del VII PM). Los **materiales y la mecánica** parecen estar bastante a la par en los últimos años **en segunda posición** seguidos de los sensores y la aplicación de microscopios de sonda de barrido. Las aplicaciones en energía no destacan.

Esta evolución **liga bastante bien con la sensación** que se ha tenido a lo largo del análisis de todos los resultados obtenidos en la elaboración de este informe.

COMPARATIVA EE.UU.



Gráfica comparativa de la financiación para las diferentes aplicaciones genéricas en EE.UU.

En contra de la sensación que se ha creado a lo largo de este informe en esta gráfica se aprecia que predominan las aplicaciones de CNT en energía frente al resto, quedando la electrónica muy alejada. Se considera que estos resultados se deben a la no actualización de datos en las BB.DD. americanas y, por tanto, los resultados de **esta última gráfica no se consideran relevantes**.

3.2.3 España

Se lista a continuación los proyectos que se han encontrado en CORDIS y el buscador de Madri+d con participación española.

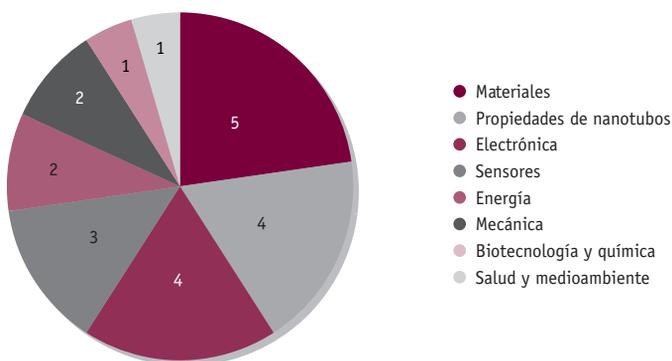
Sólo se ha incluido aquí a las empresas/instituciones españolas, pero en la mayoría de los casos los participantes son de varios países europeos. Si desea obtener más datos sobre los proyectos en el título de los proyecto tiene un acceso directo a la ficha del proyecto en CORDIS o Madri+d. También tiene un acceso directo a las empresas de las que se ha podido hallar una página Web.

Proyecto	Comentario	Empresas/Instituciones	Fecha de Inicio	Financiación
A novel gasket and seal system used for EMI shielding using double percolation of carbon nanotube technology to improve safety, profitability and productivity for SMES	Acronimo_EMISHIELD. Utilización de materiales con SMWNT para sellado electromagnético, EMI	Técnica en Instalaciones de Fluidos S.L.	12/07/2005	444.313 €
Aerospace nanotube hybrid composite structures with sensing and actuating capabilities	Acronimo_NOESIS. Estudio de materiales reforzados con CNT para el sector aeroespacial, pensando en materiales ligeros y con opciones de ser sensores y actuadores. Hablan de fibre reinforced plastics, FRP	Boreas Ingeniería y Sistemas S.A.	29/03/2005	3.080.818 €
Almacenamiento de hidrógeno por adsorción en nuevos materiales carbonosos (nanotubos y tamices moleculares)	Sistemsis de CNT a gran escala y estudio de almacenamiento de hidrógeno	Instituto de Cataláisis y Petroleoquímica (CSIC)	11/07/2001	No hay datos
Carbon nanotube devices at the quantum limit	Acronimo_CARDEQ. Desarrollo de un sensor de fuerza para medir contactos a escala nanométrica.	Institut Catala de Nanotecnologia	01/03/2006	1.950.000
Carbon nanotubes for future industrial composites: theoretical potential versus immediate application	Red de 13 instituciones para estudiar polímeros nanorreforzados con CNT	IEM (CSIC)	01/04/2001	890.794 €
Collective electronic states in nanostructures	Acronimo_COLLECT. Red de expertos para profundizar en el conocimiento de las propiedades electrónicas de nanoestructuras, entre ellas pretenden estudiar el transporte de electrones en CNT	Universidad Autonoma de Madrid	01/09/2002	1.166.000 €
Coupled mechanical and electronic properties of carbon nanotubes based systems	Creación de una red de 7 instituciones relevantes en cnt a nivel europeo para facilitar las visitas e intercambios de científicos entre sí. En la descripción del proyecto no habla de sus objetivos pero por el título parece que quieren estudiar propiedades mecánicas y eléctricas de sistemas basados en CNT.	Universidad del País Vasco	01/03/2000	1.316.000 €

Proyecto	Comentario	Empresas/Instituciones	Fecha de Inicio	Financiación
Development and demonstration of a carbon nanotube actuator for use in medical technology	Acónimo_NANOMED. Desarrollo de un actuador con CNT para medicina	AJL Ophthalmic, S.A.	01/08/2004	1.498.951 €
Development of a new machinery for nanotubes mass production based on the channel spark ablation technique (NANOSPARK)	Acónimo_NANOSPARK. Desarrollo de aparatos para obtener grandes cantidades de SWNT mediante el proceso de spark ablation. En principio los SWNT obtenidos se utilizarán en circuitos electrónicos para células solares	Ingeniería e Industrias Bioenergeticas S.L.	01/10/2004	860.992 €
Electrones de conducción en sistemas nanométricos	Estudios de películas protectoras sobre el acero de las armadura del hormigón	ICMM (CSIC)	19/12/2000	No hay datos
Improving the understanding of the impact of nanoparticles on human health and the environment	Acónimo_IMPART. Informa sobre las consecuencias en salud y medioambiente que pueden tener la nanotecnología en general	CMP Científica S.L.	01/02/2005	699.913 €
Inestabilidades asociadas a la interacción electrón en sistemas de baja dimensión: superconductores de alta temperatura crítica y nanotubos de carbono	Propiedades de superconductores y análisis del transporte en nanotubos de carbono	ICMM (CSIC)	30/12/1999	No hay datos
Integrated self adjusting nano electronics sensors	Acónimo_SANES. Desarrollo de un sensor con CNT integrados en un circuito electrónico para medir una serie de parámetros, temperatura, presión, y adaptarse a las condiciones del ambiente	Universidad del País Vasco	01/04/2001	1.201.500 €
Large scale synthesis of carbon nanotubes and their composite materials	No hay descripción del proyecto. Por el título debe ir de síntesis de cnt y de compuestos con CNT	Instituto de Carboquímica (CSIC)	01/09/2000	1.500.000 €
Materiales y dispositivos de electrones fuertemente correlacionados	No cuenta nada sobre CNT aunque lo usa como palabra clave. Investigar el autor	ICMM (CSIC)	21/12/1997	No hay datos

Proyecto	Comentario	Empresas/Instituciones	Fecha de Inicio	Financiación
Nanotubes for microstructure technology	Promueve la movilidad entre investigadores de 7 centros de investigación con el fin de mejorar en la comprensión de la estructura, purificación y propiedades de CNT	Universidad de Valladolid	01/07/1996	No hay datos
Parallel nano assembling directed by shortrange field forces	Acónimo_PARNASS. Se pretende obtener conocimiento de las fuerzas existentes entre nanopartículas pensando en fabricación de dispositivos nanoelectrónicos. Para validarlo se construirá un sensor nanoelectrónico basado en CNT	Universitat Rovira i Virgili	18/10/2005	1.947.000 €
Propiedades físicas de nanoestructuras	Estudio de estructuras electrónicas y propiedades de transporte de nanotubos entre otros sistemas. Se estudia el origen de la magnetorresistencia gigante	ICMM (CSIC)	10/01/1997	No hay datos
Selfassembly of carbon nanotube junctions in liquid environments for nanoelectronic devices	Acónimo_SATUNET. Estudio de la funcionalización de nanotubos para lograr dispositivos electrónicos. Hablan de una nueva técnica para lograr conexiones eléctricas entre los swnt y la malla del sustrato, metalorganic scanning probe assisted deposition	Universidad de Valladolid	01/01/2001	100.000 €
Selfassembly with carbon nanotubes: towards devices for information processing	Acónimo_SATURN. La investigación principal es ver el potencial de nanotubos para aplicaciones en uniones en electrónica molecular. Para ello sintetizarán SWNT mediante láser ablation y cvd, investigarán herramientas de nanomanipulación. Estudian uniones y comentan la fabricación de FEI y SET	ICMAB (CSIC)	01/01/2000	2.199.873 €
Stimulated carbonization, resulting the formation of carbon nanotubes with	No hay descripción, parece que va sobre formación de cnt con metales. Pertenace al programa metals and ions included	INTAS Instituto de Biotecnología	01/10/1999	40.000 €

El total de proyectos según sus temáticas se puede resumir en el siguiente gráfico:



Número de proyectos de participación española según temática. Fuentes CORDIS y Madri+d.

A pequeña escala **se ven reflejados los mismos temas que se han detectado en Europa y EE.UU.** Los estudios en materiales, propiedades de los nanotubos y electrónica son los que predominan.

En el [Anexo VI Empresas y centros de investigación españoles](#) se puede consultar un **listado global de todas las empresas españolas relacionadas con el uso de CNT** que han aparecido a lo largo de la realización de este informe independientemente de que se haya encontrado algún proyecto concreto suyo.

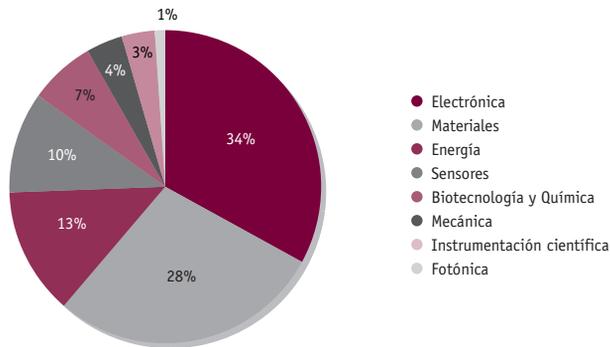
3.3 Análisis de patentes

Se hace en primer lugar un análisis global de todas las patentes utilizadas para la elaboración de este informe y, a continuación, se hace un análisis específico para cada uno de los grandes temas en los que se han agrupado las aplicaciones.

3.3.1 Análisis global

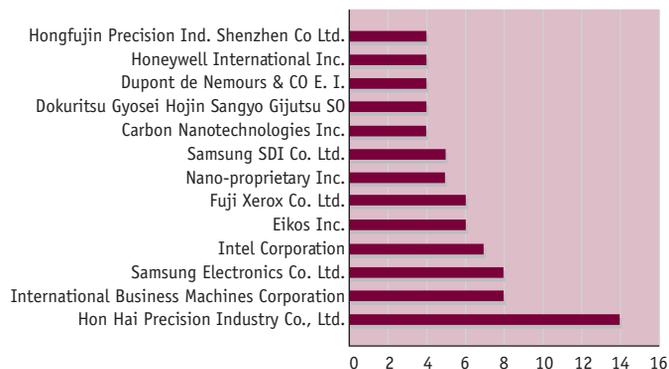
Los resultados obtenidos de las seis bases de datos de patentes sondeadas (ver [Anexo I](#)) han proporcionado una muestra de 373 patentes, a partir de las cuales se ha realizado el siguiente análisis.

El gráfico siguiente muestra las **aplicaciones** que han aparecido en las patentes. Así, el mayor porcentaje corresponde a Electrónica, seguido por Materiales.



Distribución de las patentes por temas.

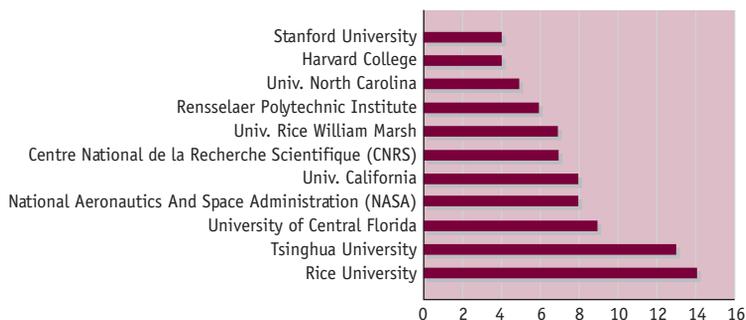
El siguiente gráfico muestra la distribución de patentes por **Empresa**:



Empresas que más han patentado en nanotubos de carbono.

Se han tenido en cuenta para la elaboración del mismo, las empresas con más de tres patentes. Como resultado destaca que las tres empresas que más patentan este tipo de tecnología son Hon Hai Precision Industry Co. Ltd. (Taiwán), International Business Machines Co. (EE.UU.) y Samsung Electronics Co. Ltd (Korea).

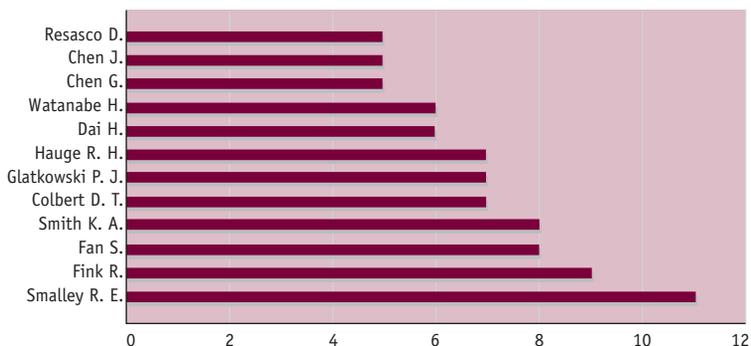
El siguiente gráfico muestra la distribución de patentes por **Centros de investigación**:



Centros de investigación que más han patentado en nanotubos de carbono.

Al igual que para el análisis de las empresas, aquí solo se han tenido en cuenta los centros con cuatro o más patentes. Así destacan por numero de publicaciones la Universidad de Rice (EE.UU.) y la Universidad de Tsinghua (China).

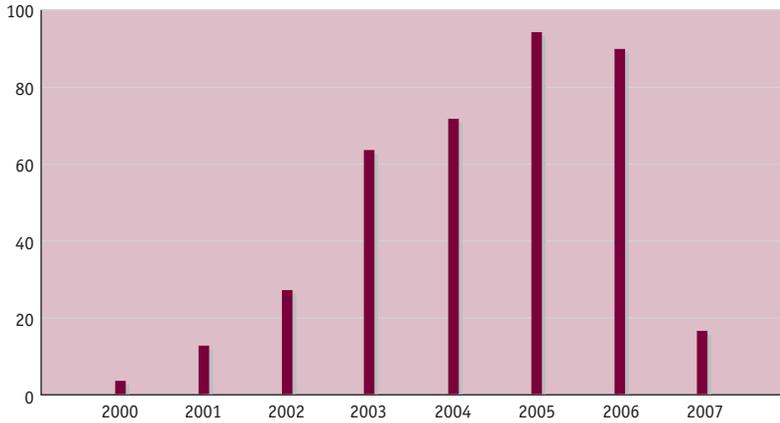
El número de patentes publicadas por cada **autor** proporciona la siguiente distribución:



Autores que más han patentado en nanotubos de carbono.

Para la elaboración de este gráfico, se han tenido en cuenta los autores con cinco o más patentes. De este modo, se observa que Smalley R. E., de la Universidad Rice, es la persona que más ha patentado este tipo de tecnología a nivel mundial.

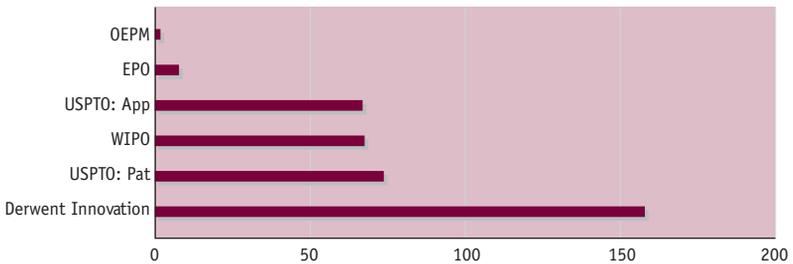
La evolución de las publicaciones a lo largo de los **años** se muestra en el siguiente gráfico:



Evolución de las patentes en el tiempo.

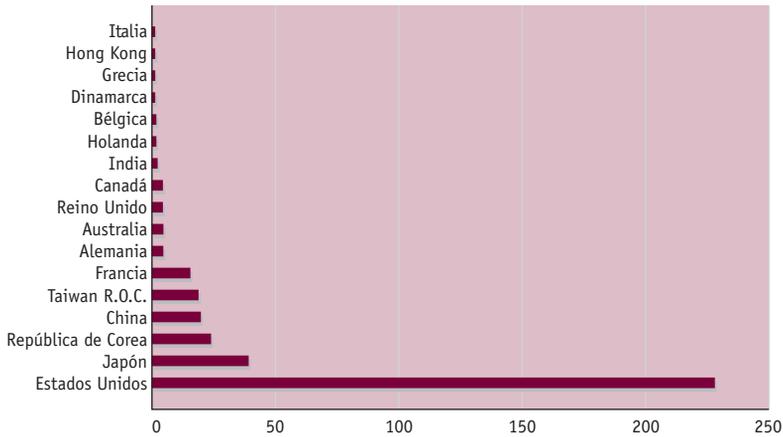
Los datos correspondientes al año 2006 no son fidedignos puesto que aun quedan muchos documentos que pertenecen al presente año y que no han sido incluidos en las bases de datos. Es importante observar la clara evolución ascendente que muestra el gráfico, lo que lleva a pensar que este tipo de tecnología está en constante evolución y además existe mucho interés por parte de la comunidad científica en seguir investigando.

Es interesante observar los resultados obtenidos en las distintas **bases de datos** consultadas:



Frecuencia de aparición de las patentes en las distintas bases de datos.

La siguiente gráfica muestra los **países** que más patentan este tipo de tecnología:



Países que más patentan en nanotubos de carbono.

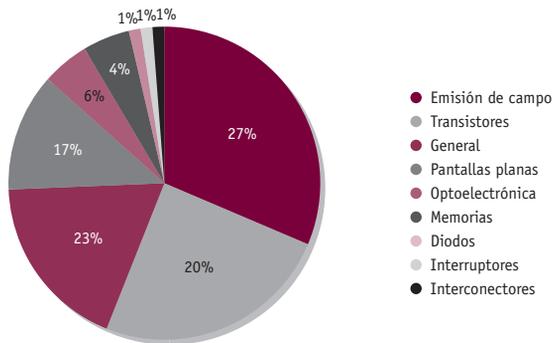
Se observa un claro liderazgo por parte de Estados Unidos. Es importante señalar que hay una importante contribución de los países asiáticos y de los de Europa, entre los que destaca Francia.

3.3.2 Análisis temático

Se analizan en los apartados siguientes las patentes que tratan sobre los distintos temas en los que se ha agrupado la información.

3.3.2.1 Electrónica

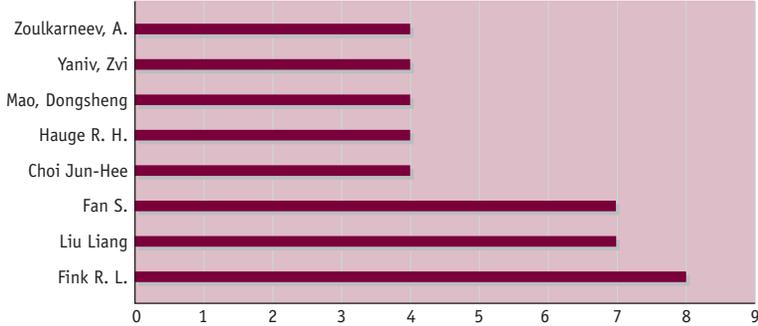
En este apartado hay 157 patentes, de las cuales un 25.7% corresponden a dispositivos de emisión de campo, seguido por los transistores, a los que corresponde un 20.2%.



Distribución de patentes según los campos de electrónica.

Autores

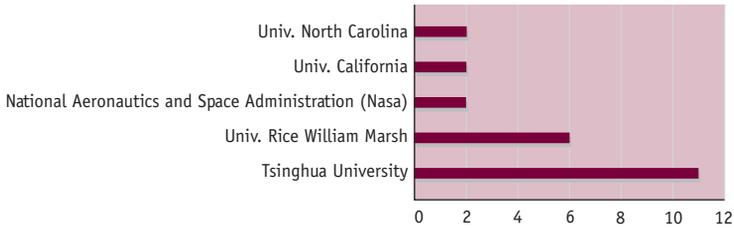
El autor que más ha patentado en componentes electrónicos fabricados a partir de nanotubos de carbono es FAN, S. de la Universidad de Tsinghua en China.



Autores que más patentan en electrónica.

Centros de I+D

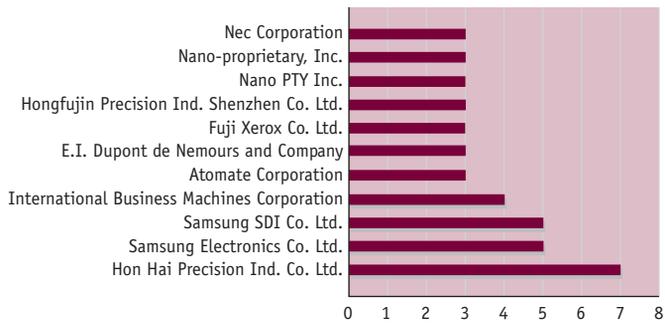
De los centros de investigación que han patentado en electrónica, destaca la Universidad de Tsinghua en China, que es, además, a donde pertenece el autor que más ha publicado en esta tecnología. Fundamentalmente se dedican a la síntesis de nanotubos de carbono, para aplicarlos a los dispositivos de emisión de campo.



Centros de investigación que más patentan en electrónica.

Empresas

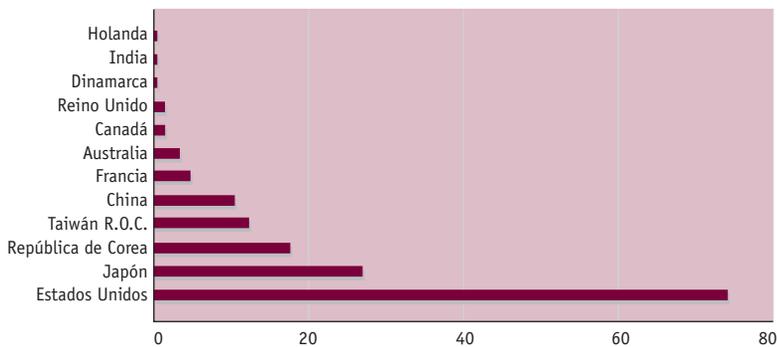
La empresa que más ha patentado es Hon Hai Precision Ind. Co. Ltd, de Taiwán. Cabe reseñar que esta empresa patenta conjuntamente con la Universidad de Tsinghua, y por tanto su campo mayoritario de investigación se centra también en los dispositivos de emisión de campo.



Empresas que más patentan en electrónica.

Países

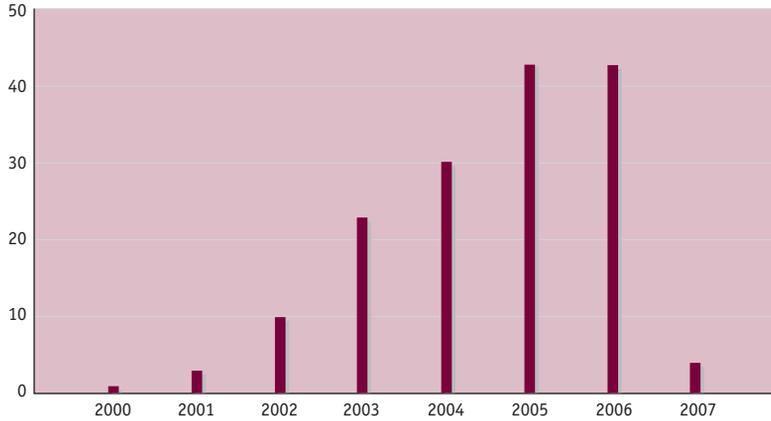
Se observa un claro liderazgo de EE.UU. seguido por varios países asiáticos.



Distribución de las patentes en electrónica por países.

Evolución de las publicaciones

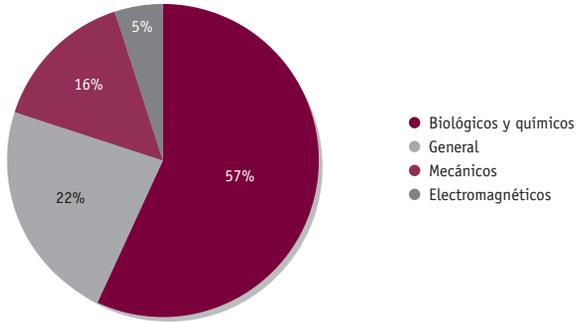
La evolución anual del número de patentes que versan sobre aplicaciones en electrónica es ascendente, lo que indica que este campo es de especial interés para empresas y comunidad científica.



Evolución de las patentes en electrónica.

3.3.2.2 Sensores

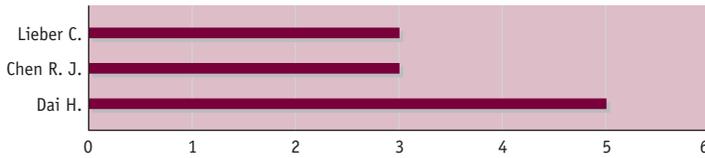
Se han detectado en este estudio, 57 patentes en las que se emplean nanotubos de carbono aplicados a sensores. En la distribución se observa que un 56.9% corresponden a sensores químicos y biológicos.



Distribución de patentes según los campos de sensores.

Autores

Dai, H. y Chen, R. J. de la universidad de Standford, junto con Lieber, C. de la universidad de Harvard, son los autores que más patentan en este campo.



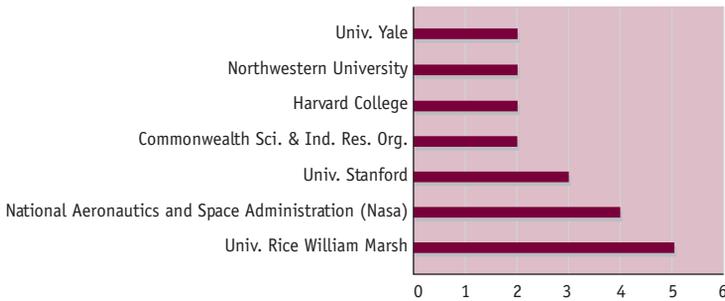
Autores que más patentan en sensores.

Centros de I+D

El centro que más patentes ha publicado referidas a la aplicación de nanotubos de carbono en sensores es la Universidad Rice William Marsh, seguida por la NASA.

La labor de la Universidad de Rice se centra en la búsqueda de nuevos métodos de purificación y dopado de nanotubos de carbono con una gran variedad de compuestos orgánicos para investigar su aplicación como sensores biológicos, químicos, o bien formar materiales compuestos capaces de medir desplazamientos, impactos, tensión,... para utilizarlos como sensores mecánicos.

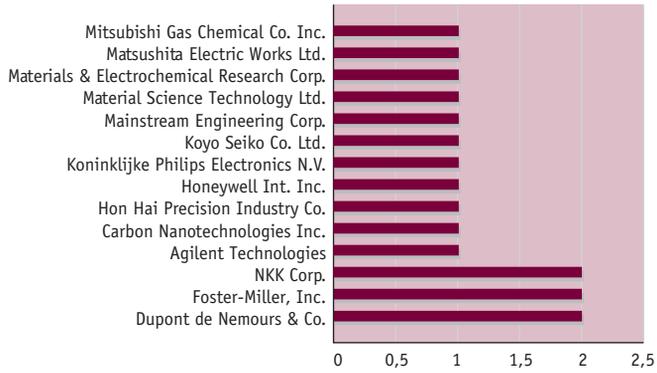
La NASA investiga en sensores ópticos donde los electrodos están fabricados de materiales basados en nanotubos de carbono. Otra parte de su trabajo se centra en los sensores mecánicos para detectar tensión, presión, ruido, torsión,... para aplicarlos en vehículos terrestres, espaciales y aéreos, para medir grietas en las estructuras, etc.



Centros de investigación que más patentan en sensores.

Empresas

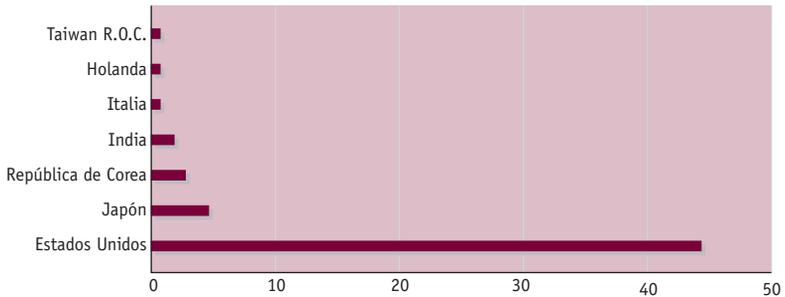
Tres son las empresas que encabezan la lista en cuanto a patentes de sensores. Son Dupont de Nemours & Co., Foster-Miller, Inc. y NKK Corp. El campo de investigación de todas ellas se centra, fundamentalmente, en el desarrollo de sensores biológicos y químicos.



Empresas que más patentan en sensores.

Países

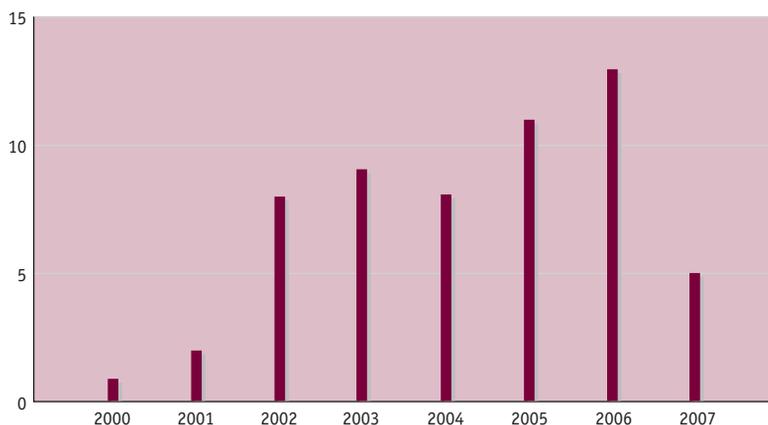
Una vez más EE.UU. copa el mercado de las patentes en esta tecnología seguido de varios países asiáticos.



Distribución de las patentes es sensores por países.

Evolución de las publicaciones

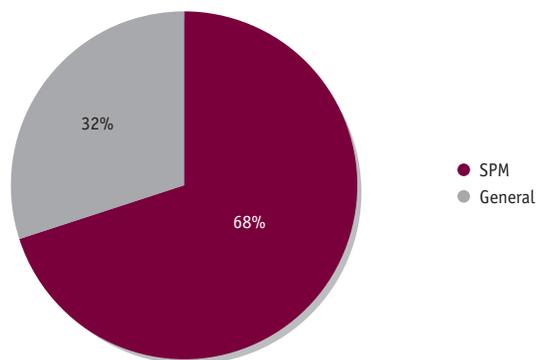
Esta tecnología despierta un claro interés dada su patentabilidad creciente a lo largo de los años.



Evolución de las patentes en sensores.

3.3.2.3 Instrumentación científica

De la 19 patentes identificadas, la mayoría se refieren al uso de nanotubos de carbono en microscopios de sonda de barrido, mientras que el resto especifican su uso en instrumentación científica.



Distribución de patentes según los campos de instrumentación científica.

Autores

En este campo todos los autores tienen la misma relevancia, como puede apreciarse en la siguiente tabla:

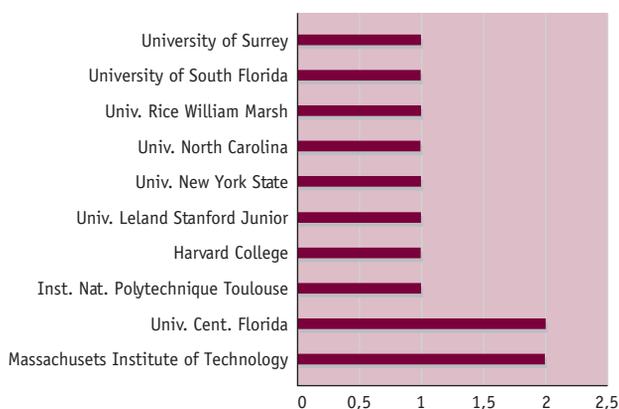
<i>Inventor</i>	<i>Nº Documentos</i>
Banerjee S.	2
Kleckey L.	2
Stevens Ramsey M.	2
Wong S.	2
Zhou S.	2

Autores que más patentan en instrumentación científica.

Centros de I+D

El Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT) junto con la Universidad de Florida son los dos centros de investigación que más se están dedicando al estudio de los nanotubos de carbono aplicados a instrumental científico.

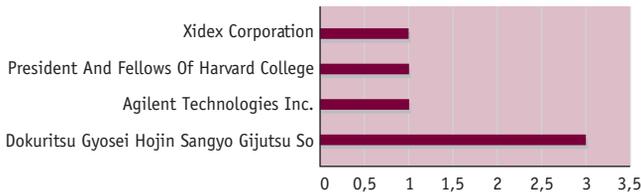
El MIT estudia los microscopios de fuerza atómica (AFM) cuyas sondas están basadas en nanotubos de carbono. Por su parte, la Universidad de Florida centra la investigación en microscopios de sonda de barrido (SPM), microscopios ópticos y sistemas emisores de electrones.



Centros de investigación que más patentan en instrumentación.

Empresas

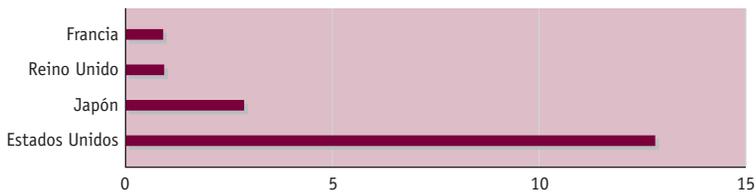
La empresa japonesa Dokuritsu Gyosei Hojin Sangyo Gijutsu So., es la que más ha patentado en este campo. Se dedica a fabricar sondas de nanotubos de carbono para los microscopios mejorando, por ejemplo, la adhesión de los NTC a los materiales base.



Empresas que más patentan en instrumentación científica.

Países

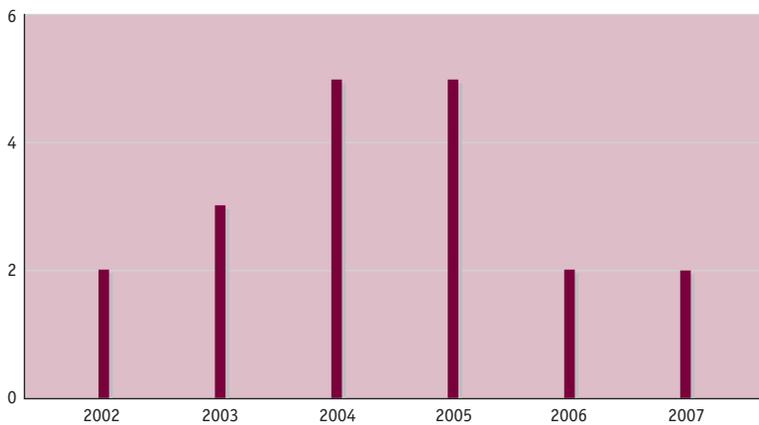
De nuevo, en este campo, el liderazgo lo asume EE.UU. seguido de Japón.



Distribución de las patentes en instrumentación científica por países.

Evolución de las publicaciones

Las patentes muestran una clara evolución ascendente hasta 2005. En los años posteriores se aprecia un ligero descenso, que en el caso de 2006 puede ser debido a la existencia de patentes todavía no concedidas que no figurarían en las bases de datos consultadas.



Evolución de las patentes en instrumentación científica.

3.3.2.4 Fotónica

Para la aplicación Fotónica se han identificado 6 patentes, cuyo análisis estadístico es el que sigue a continuación.

Autores

En autores no destaca ninguno, puesto que todos los que aparecen poseen tan solo una patente en este campo de aplicación.

<i>Inventor</i>	<i>Número de Documentos</i>
Bahr, Jeffrey, L.	1
Banerjee S.	1
Dyke C. A.	1
Kahn M. G. C.	1
Kuper, Cynthia	1
Kuzma, Mike	1
Tour J. M.	1
Tour, James, M.	1
Wilson S. R.	1
Wong S. S.	1
Yang, Jiping	1

Autores que más patentan en fotónica.

Empresas y Centros I+D

En esta área, en los documentos detectados sólo aparecen identificados como centros de investigación la Universidad de Rice William Marsh y dos empresas, Versilant Nanotechnologies, Llc. y Luna Innovations, Inc.

<i>Empresas y Centros I+D</i>	<i>Número de Documentos</i>
Univ. Rice William Marsh	3
Versilant Nanotechnologies, LLC.	1
Luna Iinnovations INC.	1

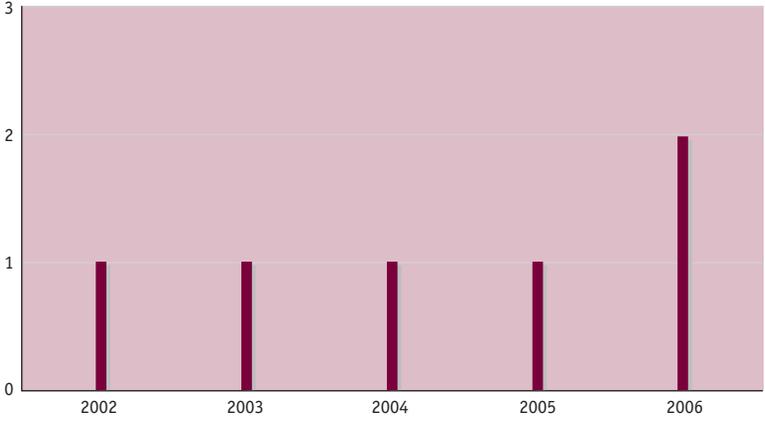
Empresas y Centros de I+D que más patentan en fotónica.

Países

En cuanto a países, tan solo aparece Estados Unidos.

Evolución de las publicaciones

La evolución de las publicaciones experimenta un ligero aumento en 2006.



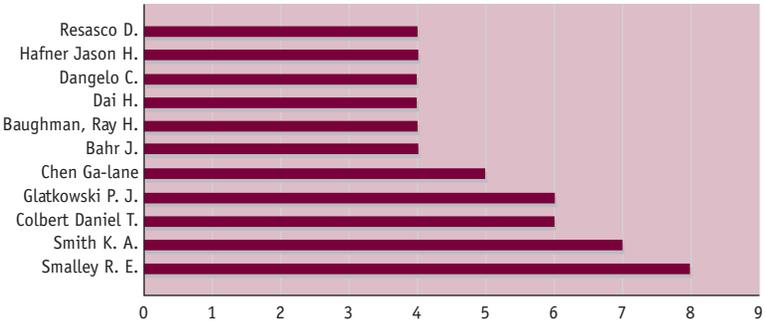
Evolución de las patentes en fotónica.

3.3.2.5 Materiales

En este campo de aplicación se han detectado 157 patentes, que se analizan a continuación.

Autores

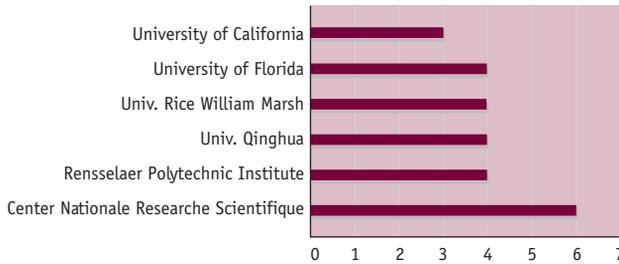
En el campo de aplicación de materiales destaca Smalley R. E. con 8 patentes, seguido por Smith K. A. con 7 patentes, ambos pertenecientes a la Universidad de Rice.



Autores que más patentan en materiales.

Centros de I+D

En centros de investigación ocupa el primer lugar en número de patentes el Centro Nacional de Investigaciones Científicas (CNRS) de Francia. Su labor investigadora se basa en materiales compuestos y fibras que contienen nanotubos de carbono para usos como catalizadores, recubrimientos, materiales de refuerzo, almacenamiento de energía, etc.



Centros de investigación que más patentan en materiales.

Empresas

En cuanto a empresas, esta área la lidera la japonesa Hon Hai Precision Industry Co. Ltd., seguida por la americana Eikos Inc.

Hon Hai Precision Industry Co. Ltd. estudia los nanotubos de carbono para crear estructuras térmicas para disipadores de calor, materiales para proteger de la radiación electromagnética, etc.

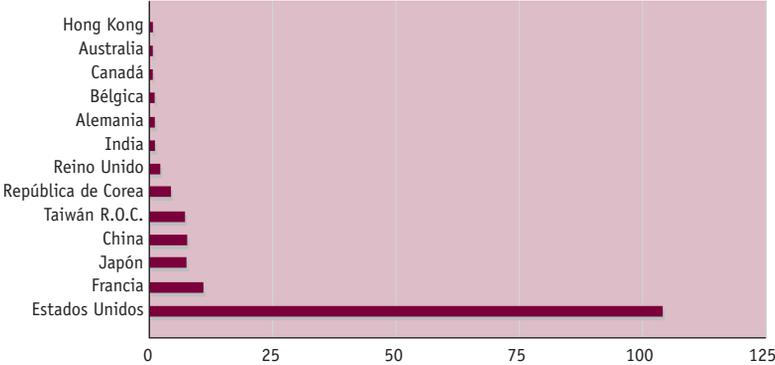
Eikos, Inc. desarrolla matrices poliméricas con nanotubos de carbono, para aplicaciones en electrónica, energía, recubrimientos, etc.



Empresas que más patentan en materiales.

Países

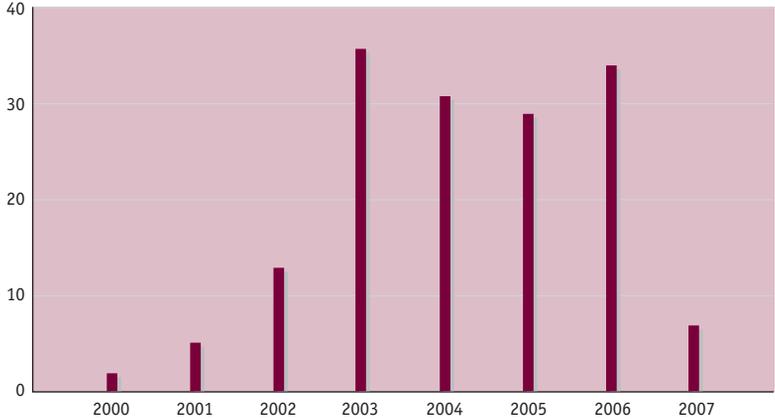
Estados Unidos lidera, en cuanto a número de patentes, en el campo de aplicación Materiales, seguido, muy de lejos, por Francia.



Distribución de las patentes en materiales por países.

Evolución de las publicaciones

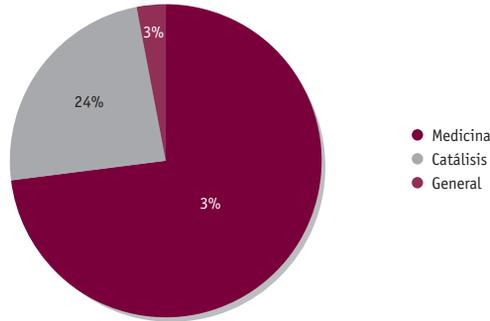
Las publicaciones en Materiales han ido aumentando progresivamente hasta 2003, momento en que sufren un pequeño descenso. Puede verse en el gráfico siguiente:



Evolución de las patentes en materiales.

3.3.2.6 Biotecnología y química

En el campo de biotecnología y química, la medicina, con un 73.7% de los 35 documentos identificados, es el apartado en que más se patenta.



Distribución de patentes según los campos de biotecnología y química.

Autores

En la tabla siguiente se muestran los autores más relevantes en este tema.

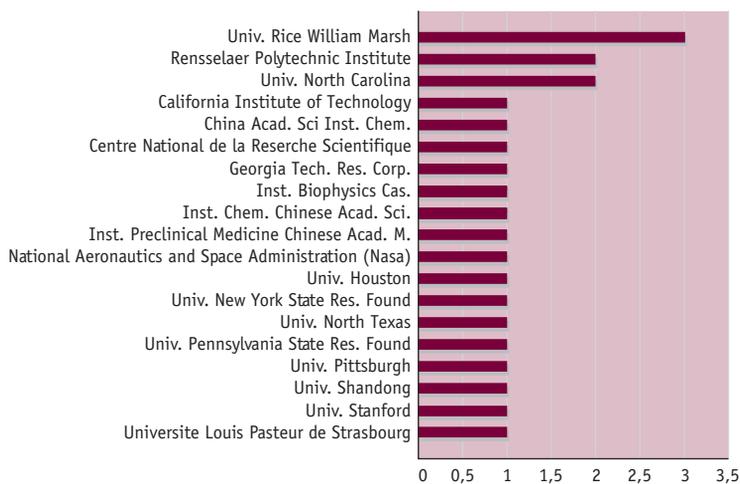
<i>Inventor</i>	<i>Número de Documentos</i>
Zhou O.	2
Wong S.	2
Roberts J. A.	2
Imholt T.	2
Dai Hongjie	2
Banerjee S.	2

Autores que más patentan en biotecnología y química.

Centros de I+D

La universidad Rice William Marsh de EEUU., destaca patentado en este campo, con 3 patentes, dedicada al estudio de materiales compuestos de nanotubos de carbono para aplicaciones biomédicas, como el diagnóstico por imagen, sensores, prótesis...

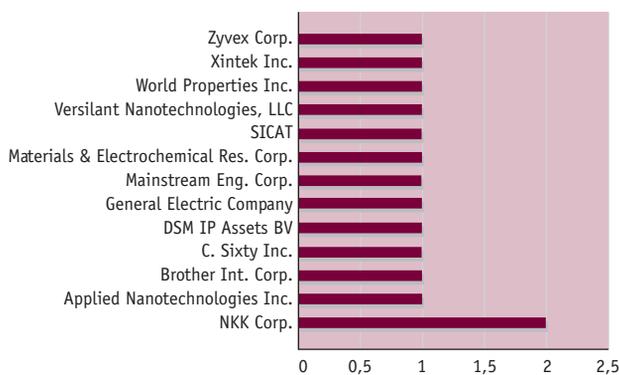
Le siguen el Instituto Politécnico Rensselaer y la Universidad de Carolina del Norte.



Centros de investigación que más patentan en biotecnología y química.

Empresas

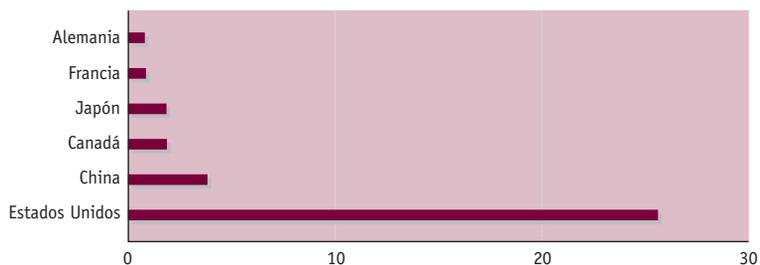
En cuanto a empresas que patentan en el área de Biotecnología y Química, ocupa un lugar destacado la empresa japonesa NKK Corp, con 2 patentes, que versan sobre membranas, sistemas de adsorción, etc.



Empresas que más patentan en biotecnología y química.

Países

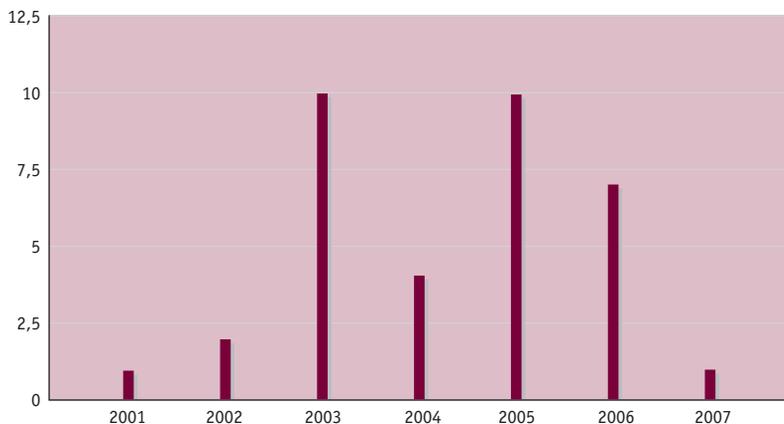
Estados Unidos lidera de nuevo este campo, seguido por China con solo 4 patentes.



Distribución de las patentes en biotecnología y química por países.

Evolución de las publicaciones

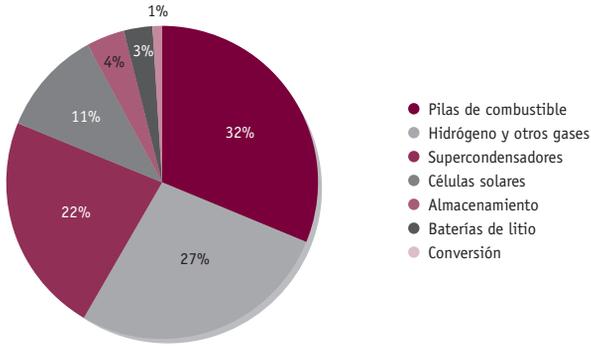
La evolución de las publicaciones muestra un ritmo al alza en los primeros años, y luego un mantenimiento.



Evolución de las patentes en biotecnología y química.

3.3.2.7 Energía

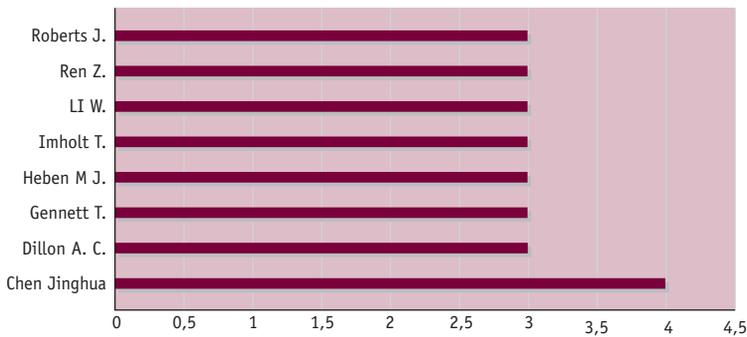
Se han identificado 57 patentes de aplicaciones de nanotubos de carbono en el campo energía. De ellas, un 31.5% tratan sobre pilas de combustible, seguido por un 27.4% sobre almacenamiento de hidrogeno y otros gases.



Distribución de patentes según los campos en energía.

Autores

Chen Jinghua destaca con 4 patentes en la aplicación Energía.



Autores que más patentan en energía.

Centros de I+D y Empresas

El instituto de investigación Midwest y la Universidad de Texas, con 3 patentes cada uno, son los centros que lideran este campo.

El Instituto Midwest, trabaja en el almacenamiento de hidrogeno y otros gases, mientras que la Universidad de Texas, centra su investigación en la generación de energía, para aplicaciones militares, en el espacio,...

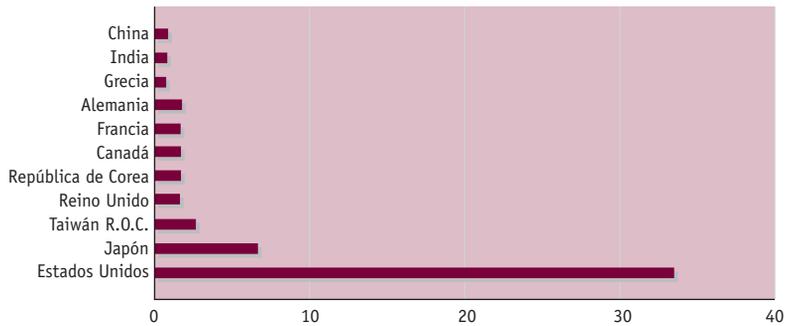
En empresas no hay ninguna que ocupe un lugar destacable. Honeywell Int. Inc., NKK Corp. y Sony Deutschland GmbH. ocupan los primeros puestos con 2 patentes por empresa.

<i>Centros I+D y empresas</i>	<i>Número de Documentos</i>
Midwest Research Institute	3
Univ. North Texas	3
Canada Min. Nat. Defence	2
Boston College	2
Univ. California	2
Honeywell International INC.	2
NKK Corp.	2
Sony Deutschland GMBH	2

Centros de I+D y empresas que más patentan en energía.

Países

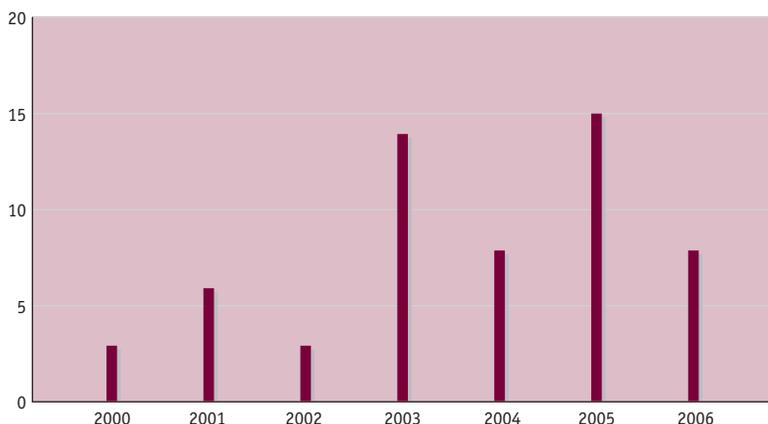
En el campo de la Energía Estados Unidos es de nuevo el líder en cuanto a número de patentes, seguido de dos países asiáticos: Japón y Taiwán.



Distribución de las patentes en energía por países.

Evolución de las publicaciones

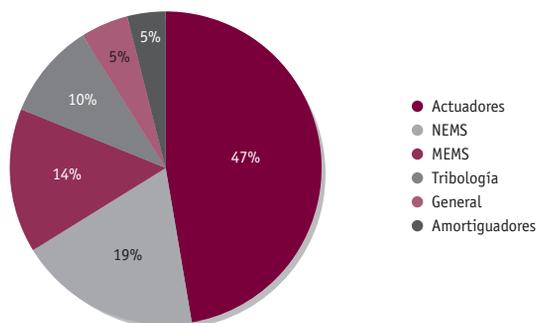
Las publicaciones en esta área muestran una evolución anual con tendencia al alza.



Evolución de las patentes en energía.

3.3.2.8 Mecánica

En este campo se han identificado 19 patentes, de las cuales un 47.6% se refieren a actuadores. Le sigue en orden de importancia, con un 19%, los NEMS.



Distribución de patentes según los campos de mecánica.

Autores

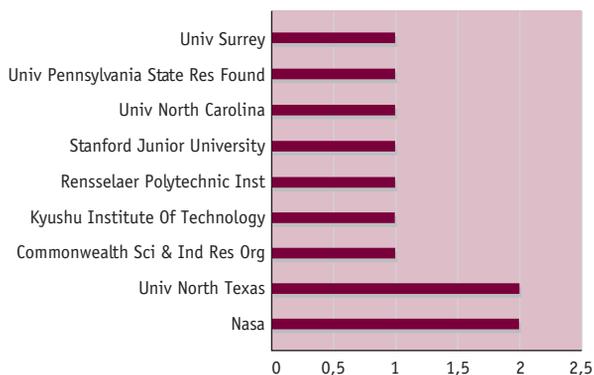
Como se observa en la tabla adjunta, varios son los autores que destacan con el mismo número de patentes.

<i>Inventor</i>	<i>Número de Documentos</i>
Baughman R. H.	2
Imholt T.	2
Kozlov, Mihail	2
Ogawa Atsuko	2
Roberts J.	2
Silva P. S. R.	2

Autores que más patentan en mecánica.

Centros de I+D

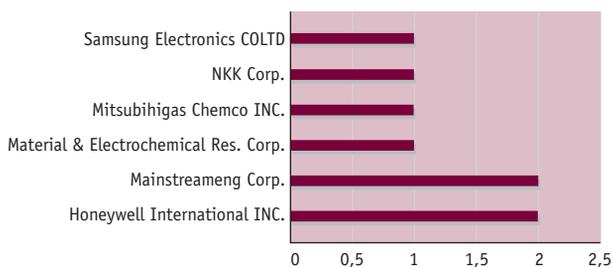
La NASA, junto con la Universidad de Texas, con dos publicaciones cada una, destacan patentando en este tema. La NASA investiga materiales poliméricos con nanotubos de carbono para su aplicación como actuadores y en NEMS. La universidad de Texas también muestra su interés en los actuadores y, además, en la aplicación de nanotubos de carbono como generadores de chispa en los motores.



Centros de investigación que más patentan en mecánica.

Empresas

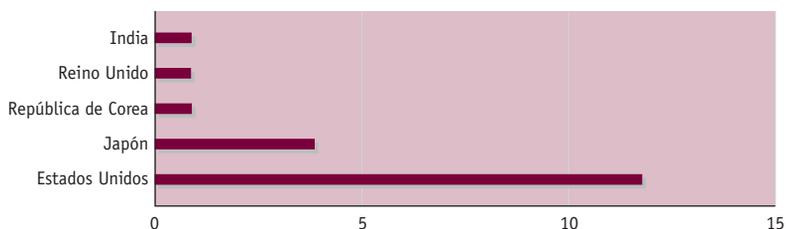
Honeywell Int. Inc. y Mainstream Eng. Corp. destacan en la publicación de patentes en esta área. Trabajan en la aplicación de nanotubos de carbono a sistemas de frenado, como actuadores, etc.



Empresas que más patentan en mecánica.

Países

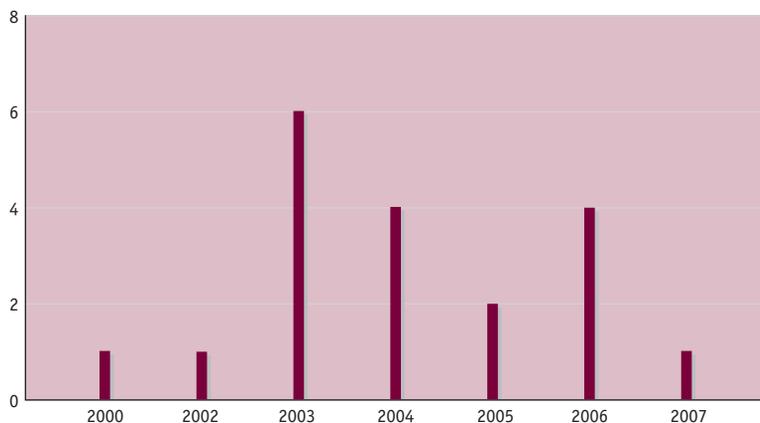
Estados Unidos lidera de nuevo esta aplicación seguido por Japón.



Distribución de las patentes en mecánica por países.

Evolución de las publicaciones

La evolución en el tiempo es ascendente en los primeros años, mostrando una ligera tendencia a la baja en los dos siguientes, y recuperando su ritmo en 2006.



Evolución de las patentes en mecánica.

CAPÍTULO 4

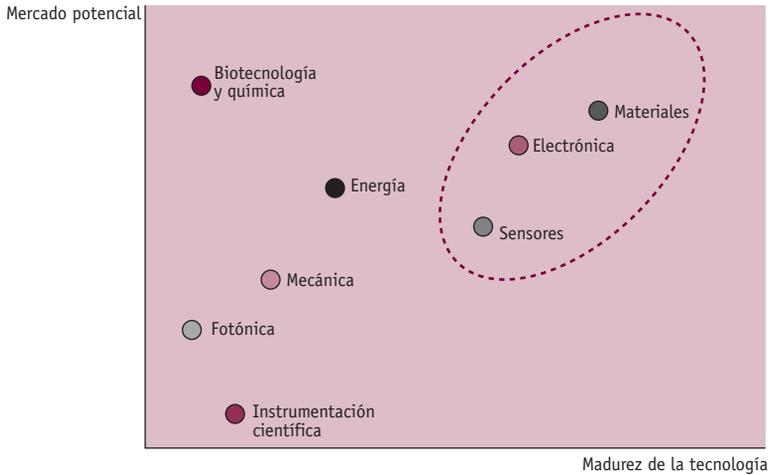
Datos de mercado

- 4.1 Análisis de mercado (PÁG. 165)
- 4.2 Agentes públicos y privados involucrados en el desarrollo de aplicaciones de nanotubos (PÁG. 170)

Se incluyen dos apartados en esta sección. En primer lugar se presenta un análisis de mercado que pretende mostrar en qué estado se encuentra cada aplicación de cara a su introducción al mercado y, en segundo lugar se presentan los agentes públicos y privados detectados en el presente estudio que están involucrados en el desarrollo de aplicaciones de nanotubos de carbono.

4.1 Análisis de mercado

Se ha intentado reflejar en el siguiente gráfico la madurez y el mercado potencial de las distintas aplicaciones de los nanotubos de carbono detectadas en nuestro estudio, según criterio del CIMTAN.



Las aplicaciones con mayor mercado potencial y con un mayor desarrollo son los **materiales**, la **electrónica** y los **sensores**, principalmente los químicos y biológicos. El elevado mercado potencial de las aplicaciones en **bioteología y química** es debido a las aplicaciones médicas que, especialmente en el caso de administración de medicamentos, tienen un futuro prometedor, pero se trata de una tecnología muy inmadura. La **energía** también es de esperar que sea una aplicación con un gran mercado potencial, pero todavía tiene que evolucionar mucho para conseguir la madurez adecuada. La **mecánica**, la **fotónica** y la **instrumentación científica** son tecnologías poco maduras y, además, con menor mercado potencial que todas las aplicaciones mencionadas con anterioridad.

Durante la elaboración de este informe se han buscado aplicaciones que incorporen nanotubos de carbono y que ya estén presentes en el mercado. Como se verá en la tabla expuesta a continuación, sólo se han encontrado compuestos y aplicaciones de éstos en material deportivo. Hay otras empresas que en algún momento han anunciado el desarrollo de prototipos de productos; en estos casos falta superar ciertas limitaciones que impiden dar el salto a la producción industrial para hacerlos comerciales. Esto demuestra que la revolución de los nanotubos todavía no ha llegado al mercado, aunque las investigaciones pronostican que irán apareciendo paulatinamente dadas las importantes mejoras que aportarán en todos los casos.

<i>Empresa</i>	<i>País</i>	<i>Producto</i>	<i>Estado</i>
Easton sports	EE.UU.	Bate de béisbol	A la venta
RTP	EE.UU.	Compuesto	A la venta
Premix Thermoplastics Inc.	EE.UU.	Compuesto	A la venta
Easton Composites	EE.UU.	Bicicleta de material compuesto	A la venta
BMC	Suiza		
Wilson	EE.UU.	Raqueta de tenis	A la venta
Babolat	Francia	Raqueta de tenis	A la venta
Völkl	Alemania	Raqueta de tenis	A la venta
Yonex	EE.UU.	Raqueta de tenis	A la venta
Yonex	EE.UU.	Raqueta de bádminton	A la venta
Montreal Hockey	Finlandia	Palo de Hockey	A la venta
Nantero	EE.UU.	Memoria	En desarrollo
Ise Electronic Co.	Japón	Lámpara de emisión de campo	Prototipo disponible
Applied Nanotechnologies Inc.	EE.UU.	Fuente de rayos X	Prototipo disponible
Seldon Laboratories, LLC	EE.UU.	Depuradores de fluidos	Prototipo disponible
Nanocomp Technologies	EE.UU.	Tejido	Prototipo desarrollado en 2007
Motorola Labs	EE.UU.	Sensor de metales pesados en agua	Prototipo desarrollado en 2006
IBM	EE.UU.	Oscilador electrónico	Prototipo desarrollado en 2006
Xidex Corporation	EE.UU.	Punta de sonda para AFM	Prototipo desarrollado en 2006
Fujitsu Laboratories	Japón	Disipador de calor para electrónica	Prototipo desarrollado en 2005
Motorola Labs	EE.UU.	Pantalla de emisión de campo	Prototipo desarrollado en 2005
Applied Nanotech	EE.UU.	Pantalla de emisión de campo	Prototipo desarrollado en 2005
General Electrics Global Research	EE.UU.	Diodo	Prototipo desarrollado en 2004
Samsung	Korea	Pantalla de emisión de campo	Prototipo desarrollado en 1999

El mercado mundial está dominado por los MWCNT porque son más baratos de producir que los SWCNT. Los MWCNT se utilizan en aplicaciones donde el precio es más importante que la estructura del nanotubo, como el refuerzo de compuestos, mientras que los SWCNT son los preferidos en aplicaciones como la electrónica donde se necesitan nanotubos con gran perfección en su estructura aunque sean más caros.

El precio de los nanotubos de carbono es muy variado, oscilando desde los \$10 por gramo hasta los \$2000 por gramo, dependiendo del tipo de nanotubo, su pureza y calidad. Como ejemplo, pueden consultarse distintos precios según las características en la página web <http://www.cheaptubesinc.com/pricelist.htm>. Otro ejemplo serían los precios que expone la empresa "[Carbon nanotechnologies incorporated](#)" en su página web.

El mercado de los nanotubos de carbono depende totalmente del mercado de las aplicaciones en las que se emplean. Sin embargo, el desarrollo de éstas está condicionado por los elevados precios de los nanotubos de carbono así como por la dificultad existente en la producción masiva de éstos, en su pureza y en la capacidad para controlar de forma exacta sus características y, por tanto, sus propiedades. Pero el desarrollo de las aplicaciones no sólo depende de esto; es necesario, además, poder controlar y manipular adecuadamente los nanotubos de carbono para que las aplicaciones basadas en ellos se puedan fabricar mediante un proceso industrial y ser así comercializadas. Algunos fabricantes de aplicaciones han desarrollado prototipos en sus laboratorios de forma más o menos artesanal, pero no podrán introducirlas en el mercado hasta que puedan producirlas en grandes cantidades en un tiempo y a un precio razonables y competitivos.

La producción de nanotubos de carbono se encuentra todavía en un paso intermedio entre los laboratorios y la industria. Para conseguir dar el paso definitivo, los productores tienen que enfrentarse a ciertos retos. Entre ellos:

- Es necesario mejorar las capacidades de producción. Como se ha comentado, hay que conseguir mayores volúmenes y calidades repetitivas a menor precio para que las aplicaciones en las que se incluyen nanotubos de carbono sean viables. El éxito de las primeras aplicaciones puede ser el detonante definitivo para la irrupción de éstas en el mercado, lo cual llevará de la mano una mayor demanda de nanotubos de carbono.
- En muchos casos puede ser interesante para los productores de nanotubos de carbono introducirse en el mercado de las aplicaciones, asociándose con los fabricantes de éstas, y produciendo nanotubos de carbono con unas características concretas y específicas para la aplicación en la que se van a utilizar.
- Patentar puede ser una forma de obtener ingresos en el mercado de los nanotubos de carbono, sobre todo en los comienzos de las empresas productoras que suelen ser pequeñas, de gran potencial intelectual y que tienen que invertir un alto porcentaje de sus beneficios en I+D.

Según el informe de mercado "[Carbon nanotubes: technologies and commercial prospects](#)" elaborado por *BBC Research*, a finales de 2006 la valoración del mercado mundial de los nanotubos alcanzaba los \$50.9 millones y está previsto que alcance los \$79.1 millones en 2007. Esto significa que, manteniendo un crecimiento anual del 73,8%, alcanzará los \$807.3 millones en 2011.

Siguiendo con información extraída de la misma fuente, las principales aplicaciones de los nanotubos de carbono que generan ingresos en el mercado son los compuestos nanorreforzados, la electrónica y la energía. La evolución de los tres mercados en el período 2006-2011 puede verse en la siguiente tabla:

<i>Aplicación</i>	<i>Valoración 2006</i>	<i>Valoración 2007</i>	<i>Valoración 2011</i>
Compuestos	\$43 M	> \$50 M	\$451.2 M
Electrónica	Despreciable	Despreciable	~ \$300 M
Energía	Despreciable	Despreciable	\$53 M

Según estos datos, los compuestos reforzados con nanotubos de carbono son la aplicación líder en el mercado. La electrónica experimenta una subida espectacular, seguida de lejos por la energía. El resto de las aplicaciones siguen teniendo una valoración mínima en el año 2011, lo cual no implica que no se vayan a desarrollar, sino que probablemente lo harán más tarde cuando alcancen la madurez adecuada.

Es interesante destacar que en el informe de mercado mencionado no se tiene en cuenta el papel que pueden jugar los sensores y las aplicaciones biomédicas que, como se ha visto en la [CAPÍTULO 3. Análisis de información](#), desempeñan un importante papel superando a energía en cuanto a número de publicaciones. Incluso restringiéndonos a los datos del año 2006 se publicaron más artículos sobre sensores que sobre electrónica, lo que muestra el interés de la comunidad científica sobre este tema. Recordamos una vez más el elevado peso de los sensores químicos y biológicos en este interés.

En el mercado de los nanotubos de carbono hay que tener en cuenta ciertos peligros, entre ellos el papel que puede jugar Asia y la aceptación social de la nanotecnología.

Hay un claro interés por parte de los países asiáticos en producir nanotubos de carbono, como puede verse en los artículos y patentes tratados en este informe. Entre otras cosas puede ser debido a que los grandes gigantes electrónicos asiáticos apuestan por la nanotecnología para revolucionar un mercado próximo a alcanzar sus límites de miniaturización, rapidez y eficiencia. Esto llevará aparejada una fuerte demanda en nanotubos de carbono que intentarán obtener en sus regiones de origen. Dado que la electrónica parece ser una de las aplicaciones más prometedoras de los nanotubos de carbono, está previsto que el mercado de los nanotubos de carbono en Asia supere al de US en 2009, según el informe de mercado "[World nanotubes to 2009](#)" realizado por *Netcomposites*. En él se comenta el gran crecimiento que se prevé para China, Japón y

Corea del Sur. En cualquier caso Estados Unidos seguirá siendo un mercado interesante ya que puede encontrar muchas y muy variadas salidas a la producción de nanotubos de carbono. La previsión que se hace para Europa en el informe mencionado es que usará los nanotubos de carbono para aplicaciones aeroespaciales, electrónicas, vehículos de motor y algunas nuevas que están surgiendo como material deportivo.

En cuanto a la aceptación social de la nanotecnología, se habla mucho sobre sus posibles riesgos medioambientales y para la salud. Aunque todavía no está suficientemente estudiada su inocuidad, la falta de información acompañada de rumores, aunque estos sean infundados, puede provocar un fuerte rechazo en la sociedad como ya ha ocurrido en otras situaciones como es el caso de los productos transgénicos.

4.2 Agentes públicos y privados involucrados en el desarrollo de aplicaciones de nanotubos

En los siguientes anexos se presentan listados de empresas e instituciones involucradas en aplicaciones de los nanotubos de carbono:

- Anexo V Empresas y centros de investigación, que contiene listados extraídos de las referencias científicas, proyectos y patentes analizados durante la elaboración de este informe.
- Anexo VI Empresas y centros de investigación españoles, donde se extraen del anexo V los datos referentes a España y se complementan con datos obtenidos a partir de otras fuentes de información.

Se adjunta, además, un tercer documento con empresas europeas y norteamericanas productoras y/o consumidoras de nanotubos de carbono.

CAPÍTULO 5

Resumen y conclusiones

Los nanotubos de carbono son materiales únicos en cuanto a estructura y propiedades y ello les convierte en una importante materia prima para el desarrollo de gran número de aplicaciones a las que pueden proporcionar características singulares.

El objetivo del presente informe es detectar aplicaciones actuales y futuras de los nanotubos de carbono. Para la elaboración del mismo se han utilizado un total de 1320 documentos, de los cuales 652 son referencias científicas, 295 proyectos de investigación y 373 patentes.

Las aplicaciones identificadas mediante la búsqueda de información en bases de datos especializadas y el análisis de la misma, son las siguientes:

Materiales. Los materiales nanorreforzados con nanotubos de carbono se consiguen dispersando éstos en una matriz de otro material. Se obtienen así nuevos materiales con interesantes propiedades mecánicas, eléctricas, electrorreológicas, hidrófobas, ignífugas, ópticas, químicas y térmicas. Entre los materiales reforzados con nanotubos de carbono destacan los de uso estructural, que aprovechan las propiedades mecánicas de los nanotubos de carbono dando lugar a compuestos ligeros y con gran resistencia mecánica. Sobre materiales tratan el 27% de las referencias científicas analizadas, el 24% de los proyectos y el 42% de las patentes. Estos datos reflejan que esta tecnología despierta gran interés científico y gran interés industrial. Existe un alto grado de solapamiento de esta aplicación con otras; así, por ejemplo, para el desarrollo de algunos productos electrónicos se usan materiales compuestos que contienen nanotubos de carbono, mientras que en otros casos se utilizan nanotubos individuales y lo mismo ocurre en otras áreas. Se comercializan ya accesorios deportivos elaborados con materiales compuestos que incorporan nanotubos de carbono, como bates de béisbol, bicicletas, raquetas de tenis, raquetas de bádminton o palos de jockey. El mercado de los materiales se presenta así como el más avanzado de todas las aplicaciones potenciales de los nanotubos de carbono.

Electrónica. En el área de electrónica se han detectado numerosas aplicaciones para los nanotubos de carbono: nanocircuitos (interconectores, diodos, transistores, interruptores), emisores de campo (pantallas planas, lámparas, tubos luminiscentes, tubos de rayos catódicos, litografía por haz de electrones, fuentes de rayos X, amplificadores de microondas, tubos de descarga de gas en redes de telecomunicaciones, microscopios electrónicos, nanotriodos, betatrones), filtros RF, memorias, optoelectrónica, grabado y espintrónica. Destaca entre todas ellas la emisión de campo y, en especial, las pantallas planas. Sobre electrónica tratan un 23% de las referencias científicas analizadas, un 17% de los proyectos y un 49% de las patentes. El volumen de patentes refleja que se trata de una tecnología con gran interés industrial. También hay un importante interés científico por las aplicaciones electrónicas, como refleja el número de referencias científicas y de proyectos que tratan sobre ellas. Existen actualmente prototipos de memorias, lámparas de emisión de campo, fuentes de rayos X, osciladores, diodos y pantallas de emisión de campo.

Aunque todavía no se comercializan productos electrónicos que incorporan nanotubos de carbono, se prevé que esto ocurra en un futuro no muy lejano y en ese momento revolucionarán el mercado ofreciendo velocidad, miniaturización y larga vida útil.

Sensores. Los nanotubos de carbono pueden ser empleados para el desarrollo de sensores químicos/biológicos, mecánicos, térmicos, electromagnéticos y de emisión de campo. Los que despiertan mayor interés son los biológicos y químicos por su potencial utilización en la detección de sustancias contaminantes y para ser empleados en entornos biológicos. Los documentos que tratan sobre sensores son un 18% del total de referencias científicas, un 7% de los proyectos y un 15,5% de las patentes. El volumen de resultados refleja que hay un importante interés científico y un importante interés industrial sobre este tema. Existen actualmente prototipos de sensores de metales pesados en agua y depuradores para fluidos.

Biotecnología y química. Hay un gran número de posibles aplicaciones biotecnológicas y químicas para los nanotubos de carbono: adsorción y absorción, catálisis, electrosíntesis y medicina. Destaca de manera especial la medicina donde los nanotubos de carbono plantean una extraordinaria revolución en distintas facetas como la administración de fármacos. El 13% de las referencias científicas tratan sobre aplicaciones biotecnológicas y químicas, así como el 7% de los proyectos y el 10,2% de las patentes. Estos datos reflejan que esta tecnología despierta un importante interés científico e industrial. No se han detectado productos comerciales ni prototipos de estas aplicaciones y no se prevé que aparezcan a corto plazo.

Energía. En el área de energía, múltiples tecnologías pueden beneficiarse de la utilización de nanotubos de carbono, tanto para almacenamiento (de hidrógeno y otros gases, supercondensadores), como para conversión (pilas de combustible, baterías de ión litio, células solares). Destaca especialmente el interés que existe en la actualidad por las pilas de combustible. El 10% de las referencias científicas analizadas tratan sobre aplicaciones energéticas, así como el 7% de los proyectos y el 10,2% de las patentes. El interés científico e industrial en estas tecnologías es importante. No se han detectado productos comerciales ni prototipos sobre este tema.

Mecánica. Se han identificado en esta área la utilización de nanotubos de carbono para el desarrollo de actuadores, amortiguadores, dispositivos para fluidos, tribología, NEMS y MEMS. Destacan, en cuanto a número de resultados, los actuadores, algunos de los cuales pueden formar parte de NEMS. Un 5% de las referencias científicas tratan sobre aplicaciones mecánicas, el 5% de los proyectos y el 5,6% de las patentes. El interés científico e industrial que se aprecia hacia estas tecnologías es moderado. No se han detectado productos comerciales ni prototipos.

Instrumentación científica. Los nanotubos de carbono pueden utilizarse para la fabricación de puntas de sonda de microscopios de sonda de barrido, así como para las membranas de contadores coulter. Destacan por volumen de resultados los microscopios

de sonda de barrido y, dentro de ellos, los AFM (Atomic Force Microscope). El número de documentos que tratan sobre la utilización de nanotubos de carbono en instrumentación científica es reducido. Sólo lo hacen un 2% de las referencias científicas, un 4% de los proyectos y un 5,1% de las patentes. Estos datos reflejan un escaso interés científico y un interés industrial moderado. Se ha detectado un prototipo de punta de sonda para AFM.

Fotónica. En el área de fotónica los nanotubos de carbono permitirán mejorar los dispositivos ya existentes y, además, serán la base para la aparición de otros nuevos que aumentarán la independencia de la fotónica respecto a la electrónica. Las principales aplicaciones identificadas son filtros pasa alto para la luz, espejos absorbentes saturables para bloqueadores de modo pasivos en emisores de pulsos láser, supresores de ruido e interruptores. No hay proyectos que traten sobre este tema y sólo lo hacen un 2% de las referencias científicas y un 1,6% de las patentes. Estos datos reflejan escaso interés científico e industrial hacia esta tecnología. No se han detectado productos comerciales ni prototipos sobre este tema.

El **número de publicaciones** presenta una tendencia anual ascendente, tanto en el caso de referencias científicas como en proyectos y patentes.

Los principales **países** que publican referencias científicas son EE.UU., China, Japón y Corea, de forma que, aunque es EE.UU. el país líder, el total de las publicaciones asiáticas superan a las norteamericanas. Esto refleja el enorme interés de Asia por las aplicaciones de los nanotubos de carbono. Europa se sitúa por detrás de EE.UU. y Asia en cuanto a número de referencias científicas, ocupando España el décimo lugar mundial y el quinto europeo detrás de Reino Unido, Alemania, Italia y Francia.

En el análisis de proyectos no se puede hacer una comparación de resultados por regiones, ya que las BB.DD. utilizadas son o bien estadounidenses o bien europeas, pero no conjuntas. No se han considerado proyectos asiáticos. Es interesante destacar que España aparece como el cuarto país europeo en participaciones de proyectos, por detrás de Alemania, Francia y Reino Unido.

En patentes hay un claro liderazgo estadounidense frente al resto de regiones, seguido por Asia y Europa. No hay patentes españolas. Estos datos son un claro reflejo del enorme interés industrial de EE.UU. por las aplicaciones de los nanotubos de carbono ya que poseen un mercado muy diverso en el que pueden tener salida multitud de productos.

En general el **mercado** de las aplicaciones de los nanotubos de carbono es muy incipiente. Exceptuando algunos materiales compuestos, las aplicaciones restantes no están aún comercializadas; algunas existen ya como prototipos y otras sólo se plantean como posibilidades futuras fruto de la investigación científica.

Para que las aplicaciones de los nanotubos de carbono irruman de forma definitiva en el mercado se necesita avanzar en diversos aspectos. Los suministradores de nanotubos tienen que mejorar la cantidad, calidad y precio de los nanotubos que producen, así como su capacidad de adaptación a los requerimientos de sus clientes, y los fabricantes de aplicaciones tienen que buscar nuevas formas de manipular los nanotubos para poder desarrollar sus productos mediante procesos industriales.

Así pues, se aprecia que los nanotubos de carbono tienen un enorme interés científico e industrial. Su utilización en el desarrollo de numerosas aplicaciones puede aportar a éstas importantes mejoras que tendrán gran repercusión comercial y que se traducirán, por tanto, en grandes beneficios para las empresas que las produzcan.

Organización del informe

Este informe se entrega en dos formatos: papel y CD (éste último incluido en la contraportada del primero). La estructura de la información contenida en el CD es la siguiente:

- **Informe:**
Es el informe propiamente dicho que se entrega, además, en formato papel.
- **Anexo I Bases de datos y estrategias de búsqueda:**
Listado de bases de datos y palabras clave utilizadas.
- **Anexo II Artículos, referencias científicas:**
Listado de artículos utilizados para la elaboración del informe.
- **Anexo III Proyectos de investigación:**
Listado de proyectos utilizados para la elaboración del informe.
- **Anexo IV Patentes:**
Listado de patentes utilizadas para la elaboración del informe.
- **Anexo V Empresas y centros de investigación:**
Listado de empresas y centros de investigación involucrados en referencias científicas, proyectos y patentes.
- **Anexo VI Empresas y centros de investigación españoles:**
Listado de empresas y centros de investigación consumidores de nanotubos de carbono en España.

El fichero "Informe" es el que se entrega, además, en formato papel. Para usar el formato CD es suficiente con editar este fichero, ya que permite acceder al resto de la información mediante hipervínculos.

vt
mi+d

fundación para el
conocimiento
madri+d

