

NANOTECNOLOGÍA: ACTUALIDAD Y FUTURO

1. INTRODUCCIÓN

El prefijo "nano" hace referencia a la milésima parte de una micra, que es la milésima parte de un milímetro. El espesor de un pelo humano es de unas 60 a 120 micras. La nanotecnología puede definirse como *el estudio, diseño, creación, síntesis, manipulación y aplicación de materiales, aparatos y sistemas funcionales a través del control de la materia a nanoescala, y la explotación de fenómenos y propiedades de la materia a nanoescala*. El control a nanoescala supone la habilidad de fabricar productos y construir máquinas con precisión atómica. Fabricar a escala "nano" significa poder acceder y manipular las estructuras moleculares y sus átomos. De esta forma, la nanotecnología aborda directamente la posibilidad de diseñar materiales y máquinas a partir del reordenamiento de átomos y moléculas.

Las propiedades de los materiales dependen de cómo están ordenados los átomos que los constituyen. Según se configuren los átomos de carbono podemos tener carbón o diamante. Además, cuando se manipula la materia a la escala de átomos y moléculas se ponen de manifiesto fenómenos y propiedades totalmente nuevas. Los efectos cuánticos cobran especial relevancia. Piezas de un material de tamaño nanométrico pueden presentar propiedades completamente diferentes a las de mayor tamaño. Por ejemplo, si partiendo de una lámina de aluminio extraemos pequeños pedacitos, éstos seguirán comportándose como el aluminio aunque sean muy pequeños, de tamaño de milímetros. No obstante, las piezas de aluminio del orden de nanómetros presentan propiedades completamente diferentes: son muy inestables y explotan con facilidad.

Por lo tanto, la nanotecnología puede conducir a la fabricación de nuevos materiales, aparatos y sistemas con propiedades únicas que no pueden obtenerse con las tecnologías actuales de procesado de materiales y fabricación. Se ha comparado la revolución nanotecnológica

que comienza en la actualidad a la que se produjo con la introducción de los plásticos en la industria en los años 60. Los plásticos cambiaron en gran medida la sociedad de aquellos tiempos, y hoy día los encontramos por todas partes: en aparatos domésticos, piezas de automóviles, contenedores de alimentos, en construcción, instrumentación biomédica, etc. Se predice que los avances nanotecnológicos tendrán un protagonismo similar en nuestra sociedad del conocimiento, promoviendo multitud de desarrollos con gran repercusión empresarial y social.

Los tres grandes sectores en nanotecnología que hasta el momento han despertado mayor interés son la nanoelectrónica, la nanobiotecnología y los nanomateriales.

La nanoelectrónica persigue fabricar dispositivos electrónicos y ordenadores a escalas diminutas.

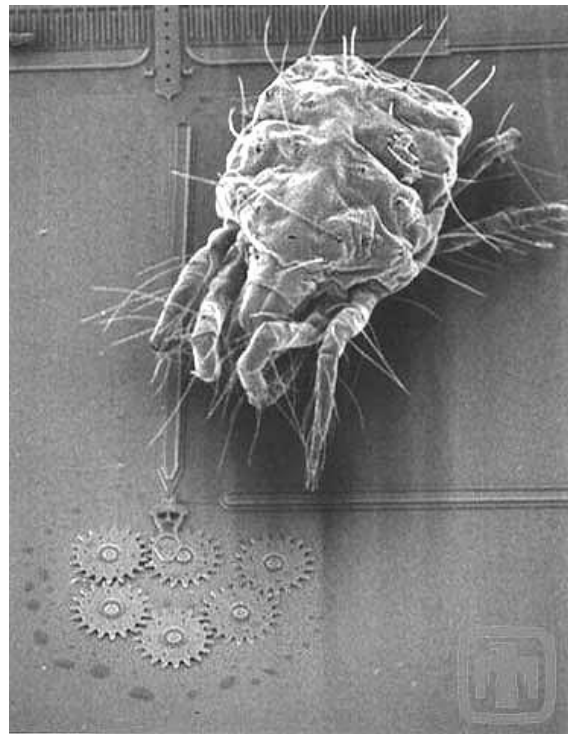
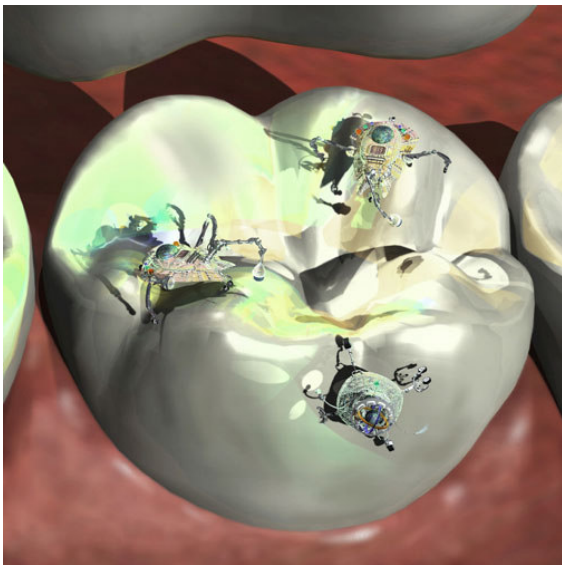


imagen de <http://mems.sandia.gov>
ácaro (tamaño ≈ 300 micras) y micromecanismo

La disminución del tamaño de los dispositivos electrónicos va habitualmente unida a un aumento de su velocidad de operación, y a una disminución de su coste. Hemos sido testigos

de cómo los chips de los ordenadores se han ido fabricando cada vez más pequeños. No obstante, en la actualidad, una disminución mayor de los dispositivos supone su fabricación a escala nanométrica, y a esta escala, su comportamiento deja de ser el habitual. No es, pues, plausible continuar simplemente reduciendo el tamaño: obtendríamos a lo más un dispositivo diminuto que no funcionaría. Es preciso buscar otras vías, otras opciones. Se plantea como posibilidad el desarrollo de la electrónica molecular, que consiste en el uso de moléculas individuales o pequeñas agrupaciones de éstas (nanoestructuras moleculares) tanto para almacenamiento de información como para computación.

La nanobiotecnología combina la ingeniería a nanoescala con la biología para manipular sistemas vivos o para fabricar materiales de inspiración biológica a nivel molecular. El objetivo radica en preparar mejores medicinas, sensores de diagnóstico más especializados, mejores materiales para implantes quirúrgicos. Se conciben pequeños instrumentos, nanomáquinas, capaces de viajar disueltos en sangre en el interior del cuerpo humano y acceder a las células individuales para diagnosticar su estado y facilitar su tratamiento, o capaces de examinar y limpiar una pieza dental.



Copyright 2001 American Dental Association

Nanorobots dirigidos por control remoto podrían examinar y limpiar una pieza dental. Los nanorobots se han dibujado a 1000 aumentos para facilitar su visualización.

Respecto al desarrollo de nanomateriales, se trata de controlar con toda precisión la morfología a dimensiones nanoescalares y posibilitar así la fabricación de nuevos materiales con nuevas propiedades.

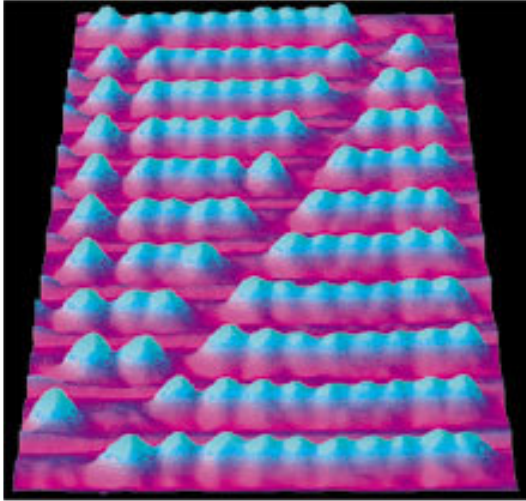
En todos estos ámbitos las ideas subyacentes a la aplicación de nanotecnología tienen mucho en común, y se utilizan los mismos métodos para medir y manipular estructuras ultra diminutas, como son, por ejemplo, los microscopios con resolución nanoescalar.

2. NANOFABRICACIÓN

La nanotecnología consiste en manipular la materia a escala atómica y molecular para crear nuevos materiales y procesos. La fabricación de nanodispositivos puede plantearse siguiendo dos tipos de procedimientos: el top-down (empezar por arriba e ir bajando) y el bottom-up (empezar por abajo e ir subiendo).

En los procesos de fabricación top-down, el punto de partida es una pieza de material de tamaño macroscópico que por maquinado, o siguiendo los métodos apropiados, se va reduciendo al tamaño deseado. Este procedimiento es el que se sigue actualmente para la fabricación de circuitos integrados. Las técnicas de ingeniería de precisión y litografía en materiales semiconductores están extremadamente desarrolladas.

En los procesos de fabricación "bottom-up" el objetivo es construir nanomáquinas átomo a átomo o molécula a molécula. Aquí entran en juego las técnicas de síntesis química molecular y el ensamblaje de moléculas o nanopartículas.

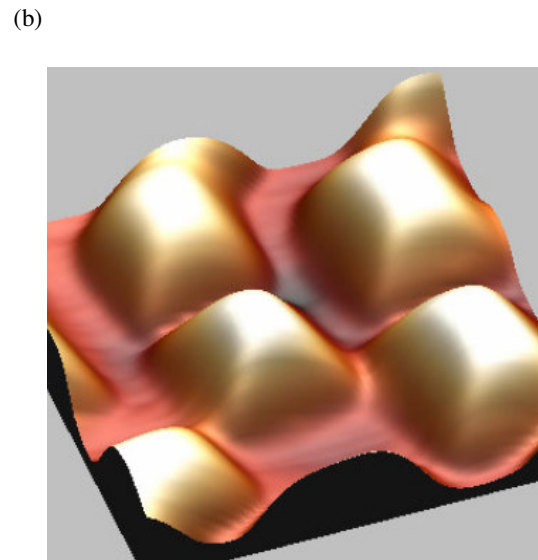
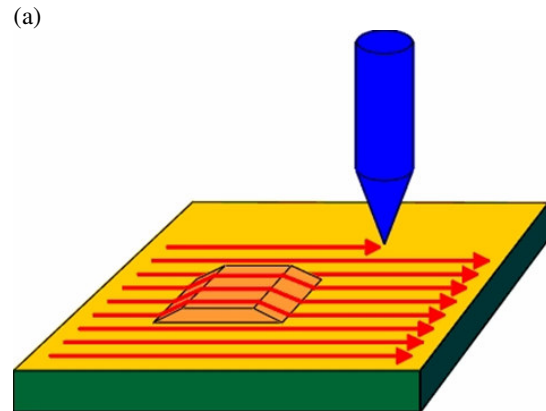


Ábaco Molecular construido en IBM-Zurich por M. T. Cuberes. Las cuentas son moléculas de Carbono 60 dispuestas en escalones monoatómicos de una superficie de cobre que se han ensamblado utilizando un Microscopio de Efecto Túnel.

(Consultar más información en <http://ina.unizar.es/docs/cen69/contenido6.html>)

Para el desarrollo de la nanotecnología ha sido fundamental la implementación de nuevas técnicas de microscopía que han permitido la caracterización de materiales a escala nanométrica e incluso su manipulación. El microscopio de efecto túnel (scanning tunneling microscope, STM), desarrollado en 1981 en los laboratorios de la IBM-Zurich por Gerd Binnig y Heini Rohrer (que recibieron por ello el Premio Nóbel en 1986), proporciona una vía de acceso a la nanodimensión, ámbito en el que nuestras manos, o las pinzas habituales, resultan excesivamente grandes. El STM permite obtener imágenes de superficies con resolución atómica. El funcionamiento del STM para la adquisición de imágenes es similar al método utilizado por los ciegos para la lectura. Como "mano", el STM utiliza la punta de un alambre metálico, afilada hasta acabar en dimensiones atómicas. Acercando la punta hasta la superficie a distancias del orden de ángstroms (centésima parte de la millonésima parte de un centímetro), y controlando la corriente electrónica que se establece por efecto túnel entre la punta y la muestra (estableciendo una diferencia de potencial, y manteniendo constante la distancia de separación entre ambas), es posible visualizar la superficie "palpada"

cuando la punta barre las distintas zonas topográficas. El movimiento de la punta dibuja la topografía superficial.

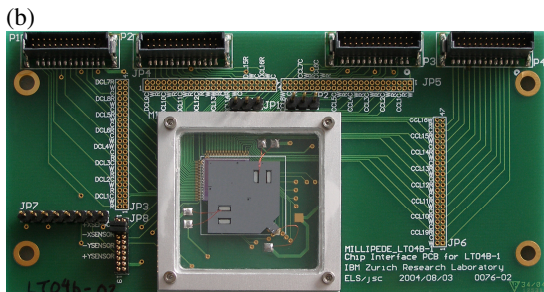
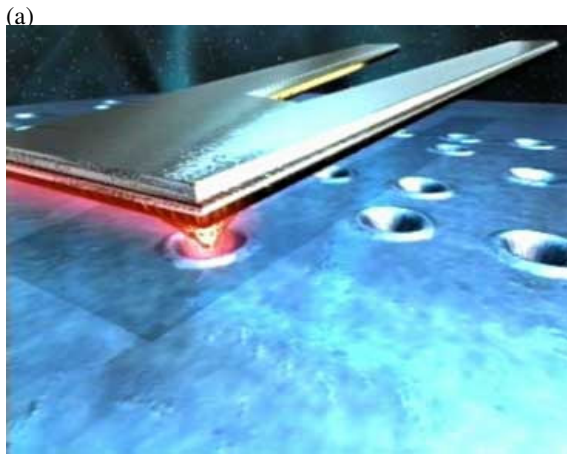


(a) imagen de <http://www.physik.tuberlin.de/institute/IFFP/daehne/index.htm?institute/IFFP/daehne/forsch/rt-stm.htm>
Esquema de un STM

(b) Puntos cuánticos Co/Si/Si(111) medidos con AFM en el Laboratorio de Nanotécnicas y Nanoensayos de Almadén (tamaño de la imagen: 1,8 micras x 1,8 micras)

A partir del STM, se han desarrollado toda una familia de técnicas de Microscopía de Sonde de Barrido (Scanning Probe Microscopy, SPM) que utilizan como principio para obtener imágenes de superficies

el controlar algún tipo de interacción punta-muestra. Así, en el Microscopio de Fuerzas Atómicas (Atomic Force Microscopy, AFM), se controla la fuerza repulsiva que actúa entre una punta y una superficie al entrar en contacto. Utilizando el AFM en el modo de Microscopía de Fricción (Friction Force Microscopy, FFM) es posible estudiar propiedades tribológicas y adhesivas en superficies y nanoestructuras. El modo de Microscopía de Fuerza Modulada (Force Modulation Microscopy, FMM) permite la caracterización de la nanoestructura elástica y viscoelástica, y su respuesta adhesiva a nivel local. Es más, utilizando estas técnicas es posible "escribir" a escala atómica, utilizando la punta sensora para "marcar" una superficie, e incluso "manipular" átomos y moléculas individuales reposicionándolos lateralmente a voluntad en superficies. De esta manera, estos instrumentos, posibilitan el almacenamiento de información a escala atómica, y la construcción "nanomáquinas" basadas en unidades funcionales moleculares, proporcionando una vía de acceso al "nanomundo".



Un proyecto de investigación en IBM, el "millipede" ha demostrado la posibilidad de lograr densidades de almacenamiento de información mayores de 1 Tb/in² utilizando la punta de un "cantilever" de Microscopio de Fuerzas Atómicas. La punta "escribe" creando pequeñas depresiones sobre un medio polimérico. La misma punta puede utilizarse para "leer" la información (a). Una matriz de puntas puede integrarse en un dispositivo MEM (MicroElectroMecánico) (b). (consultar más información en <http://www.zurich.ibm.com/st/storage/>)

3. NANOMATERIALES Y NANODISPOSITIVOS

Dentro del concepto de fabricación "bottom-up", en nanotecnología se espera construir nanomáquinas, o materiales macroscópicos nanoestructurados partiendo de unidades o nano-objetos nanométricos. Hoy día se está dedicando una gran atención al estudio y fabricación de tales nano-objetos y a su comercialización. Los nano-objetos pueden ser moléculas individuales o nanopartículas. Un nano-objeto individual, o un pequeño grupo de nano-objetos, puede implementarse como nanodispositivo. Ejemplos típicos de nanodispositivos son los nanosensores, que pueden proporcionar información acerca del entorno en el que están ubicados, y son particularmente útiles en ámbitos como la medicina, el control medioambiental o la automatización. Se han propuesto sensores ultra sensitivos capaces de detectar las alteraciones genéticas causantes de una enfermedad. Se conciben nanopartículas sensoras capaces de penetrar en células cancerígenas y liberar enzimas que inicien su "apoptosis" o secuencia auto-destructiva.

Una nanopartícula se define como una pequeña porción de material de dimensiones menores de 100 nm. Las propiedades de las nanopartículas dependen tanto de su composición química como de su tamaño. Casi cualquier material puede fabricarse en forma de nanopartículas, incluyendo el carbón, metales, polímeros, silicio, etc.

Las moléculas orgánicas constituyen una clase especial de nanopartículas. Por ejemplo, la molécula de Carbono 60, denominada "buckyball" o fullereno (buckminsterfullereno) descubierta en 1985 por Robert F. Curl Jr., Harold W. Kroto y Richard E. Smalley (que recibieron por ello el

premio Nóbel de Química en 1996) tiene un papel relevante en nanotecnología por múltiples aplicaciones: puede actuar como cápsula flexible y resistente, presenta propiedades superconductoras, ofrece una elevada estabilidad térmica, etc. El nombre de Buckminsterfullereno hace referencia al arquitecto norteamericano Richard Buckminster Fuller (1895-1983) diseñador de los "domos geodésicos" o cúpulas esféricas de cristal fabricadas en base a láminas de vidrio en forma pentagonal y hexagonal unidas por sus lados. La molécula está constituida por 60 átomos de Carbono dispuestos en hexágonos y pentágonos que adoptan la forma de una pelota de fútbol de 1 nm de diámetro.

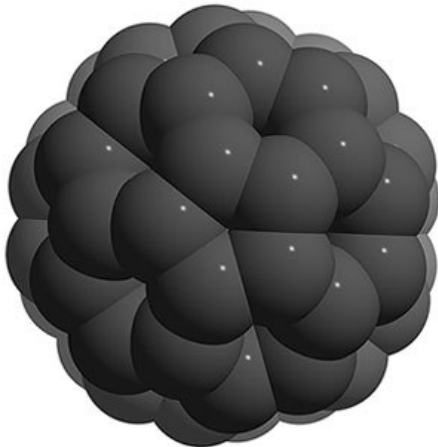
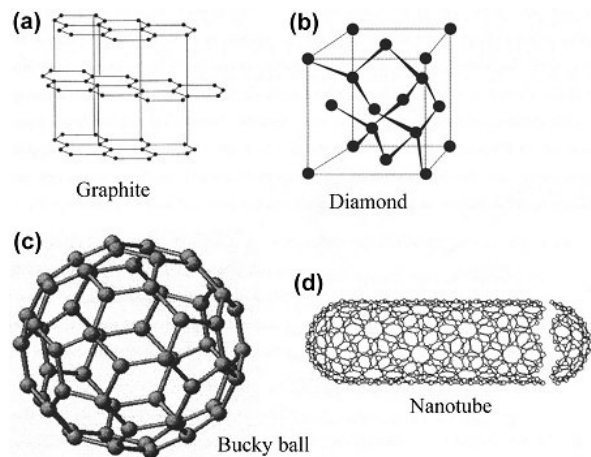


imagen de <http://www.3dchem.com/molecules.asp?ID=217#>
Molécula de Carbono 60.

Otros nano-objetos muy interesantes son los llamados "nanotubos" (también de la familia de los buckminsterfullerenos). Los nanotubos se componen de una o varias láminas de grafito u otro material enrolladas sobre sí mismas, con un diámetro de unos nanómetros. Existen nanotubos monocapa (un sólo tubo) y multicapa (varios tubos metidos uno dentro de otro, al estilo de las famosas muñecas rusas). Los nanotubos de carbono son las fibras más fuertes que se conocen. Un solo nanotubo perfecto es de 10 a 100 veces más fuerte que el acero por unidad de peso. Además, poseen propiedades eléctricas muy interesantes. Una capa de grafito es un semi-metal. Cuando se enrolla una capa de grafito en un nanotubo,

los átomos de carbono se alinean alrededor de la circunferencia del tubo, y las funciones de onda mecanocuánticas de los electrones deben también ajustarse geoméricamente. Este ajuste restringe las clases de función de onda que pueden tener los electrones, lo que a su vez afecta a su movilidad. Dependiendo de la forma exacta en la que se enrolla, el nanotubo puede ser un semiconductor o un metal. Enrollado con la geometría adecuada, un nanotubo de carbono puede conducir la corriente eléctrica con una resistencia dos órdenes de magnitud menor que la de los cables de cobre.



Según se ordenen los átomos de carbono a escala nanométrica se obtienen distintos materiales como grafito, diamante, fullereno, o nanotubo.

Con los nano-objetos es posible fabricar materiales compuestos, incorporando nanopartículas o nanofibras como refuerzo. También pueden ser utilizados en nanodispositivos. Por ejemplo, se han propuesto nanoengranajes basados en nanotubos de carbono funcionalizados. Asimismo, se ha demostrado la posibilidad de fabricar transistores con nanotubos de carbono.

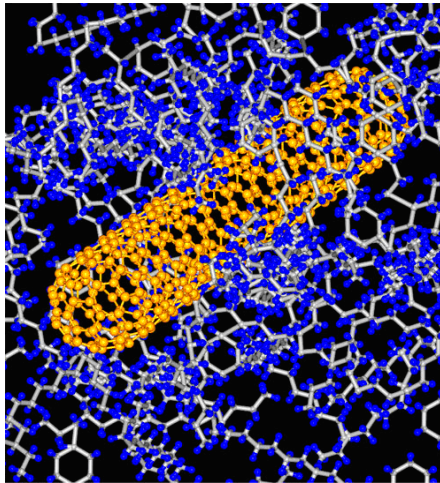


imagen de <http://www.ipt.arc.nasa.gov/gallery.html>
 Polímero reforzado con nanotubo de carbono

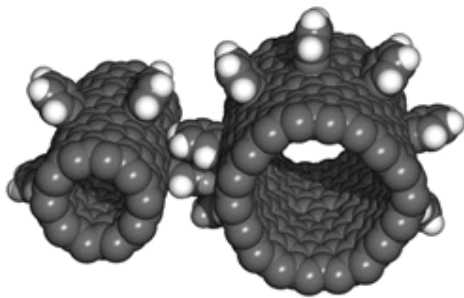
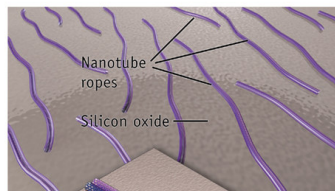
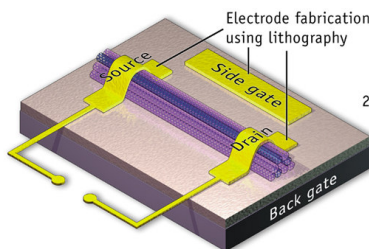
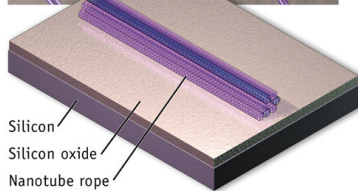


imagen de <http://www.ipt.arc.nasa.gov/gallery.html>
 Nanoengranaje basado nanotubos.

New Breakthrough Transistor Technology From IBM: Carbon Nanotubes - Constructive Deconstruction



1. Ropes of Nanotubes:
 The scientists deposit the ropes of metallic and semiconducting tubes onto a silicon wafer.



2. A mask is projected onto the tubes and the semiconducting tubes are switched off, insulating them from electricity.

imagen de [http://domino.watson.ibm.com/comm/pr.nsf/pages/rscd.transistors-picd.html/\\$FILE/1col_1.jpg](http://domino.watson.ibm.com/comm/pr.nsf/pages/rscd.transistors-picd.html/$FILE/1col_1.jpg)
 Transistor a base de nanotubos de carbono.

4. APLICACIONES DE LA NANOTECNOLOGÍA

Aunque muchos aspectos de la nanotecnología aún están en fase de investigación, se espera que en los próximos años tenga lugar un crecimiento rápido en su productividad. En la actualidad, la industria nanotecnológica tiene ya una base real, existiendo múltiples productos comerciales en el mercado. Las empresas relacionadas con la nanotecnología incluyen desde pequeñas spin-offs financiadas con capital de riesgo hasta corporaciones internacionales como IBM y Samsung. Se ha definido a la nanotecnología como una tecnología "capacitadora" (enabling technology), aplicable a distintos sectores. La nanotecnología ya ha impactado hoy a toda una gama de productos como dispositivos médicos, recubrimientos, sensores de sistemas de seguridad, aparatos de purificación del agua para viajes espaciales, pantallas para ordenadores portátiles y para cine de alta resolución, piezas o partes de automóviles, tejidos con prestaciones especiales, material deportivo, etc.

Según un estudio elaborado por la Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE)

(http://www.cincodias.com/articulo/empresas/Nanotecnologia/proxima/revolucion/cdsemp/20050801cdscdsemp_3/Tes/) el desarrollo futuro de la nanotecnología se producirá en tres fases, descritas a continuación. La primera de ellas, en la que estamos inmersos actualmente, se caracteriza por el uso de la nanotecnología principalmente en aplicaciones de industrias técnicamente punteras, como por ejemplo la industria aeroespacial. La segunda fase de desarrollo comenzará a lo largo del 2009, cuando los mercados electrónicos y de las tecnologías de la información estén preparados para incorporar las innovaciones en materia de microprocesadores y chips de memoria fabricados mediante procesos nanométricos. A partir del 2010, la nanotecnología se extenderá a todos los bienes manufacturados, destacando las aplicaciones para la salud humana como biosensores, nanodispositivos portadores de

medicamentos, etc. Se predice que la fabricación de nanoestructuras creará materiales con nuevas o mejores propiedades para uso en paneles solares, en recubrimientos anticorrosión, en herramientas de corte que serán más resistentes y más duras, etc.

A la vista del inmenso potencial de aplicación de la nanotecnología a dispositivos y bienes de consumo, en Estados Unidos, Japón y Europa, así como en otros países, se han tomado iniciativas extraordinariamente importantes en relación a la financiación, educación y organización de la investigación relacionada con esta temática. En Estados Unidos, la National Science Foundation lanzó en el 2001 el plan "National Nanotechnology Initiative" (<http://www.nano.gov>) para el fomento de la investigación multidisciplinar en este área con objetivos a largo plazo. Japón también cuenta con un poderoso plan de desarrollo de la nanotecnología, con apoyo de los sectores industriales y el gobierno. En Europa, el VI Programa Marco ha dedicado una de sus prioridades temáticas a la "nanotecnología, materiales y procesos de fabricación". En España, el Plan Nacional de Investigación 2005-2007 incluye una acción estratégica transversal de nanociencia y nanotecnología.

Diariamente, avances y actividades en nanotecnología son noticia en la prensa internacional. Comento a continuación alguna de estas noticias, que considero de interés especial. En la sección final de este artículo se incluyen referencias a páginas de internet donde pueden consultarse los desarrollos y actividades empresariales más recientes.

La nanotecnología y la energía solar

Se están estudiando nuevos materiales plásticos con nanopartículas especiales (puntos cuánticos) embebidas, que permiten la conversión de energía solar en eléctrica con sensibilidad al infrarrojo y eficiencia mejorada. Mientras que en la actualidad, las mejores células solares plásticas pueden convertir solamente cerca del seis por ciento de la energía del sol en energía utilizable, se ha propuesto recientemente un material que en

película podría capturar hasta el 30% (http://news.nationalgeographic.com/news/2005/01/0114_050114_solarplastic.html). En principio, las películas de este material se podrían aplicar como "pintura" a cualquier dispositivo. Camisetas o suéteres recubiertos de esta pintura podrían proporcionar suficiente electricidad para recargar teléfonos móviles u otros dispositivos inalámbricos.

La empresa Nanosolar (<http://www.nanosolar.com/>) ha desarrollado la tecnología necesaria para implementar células solares flexibles basadas en nanotecnología y planea construir en California la mayor planta de fabricación de estas células a nivel mundial con una producción que cubra unos 430 MWatt al año, que prevé operativa para el 2007. Las películas delgadas de tecnología solar que la compañía comercializará serán en principio 10 veces más eficiente que las células de energía solar tradicionales.



imagen de http://www.berkeley.edu/news/media/releases/2002/03/28_solar.html

Panel de ocho células solares basadas en nanotecnología, fabricadas a partir de un material compuesto, polímero semiconductor con nanofibras inorgánicas.

La nanotecnología y los materiales de construcción

La nanotecnología también puede aportar mejoras a la construcción de carreteras, puentes y edificios. Se prevé que la aplicación de la nanotecnología en las carreteras y la construcción permitirá identificar y reparar de forma automática, sin intervención humana, brechas y agujeros en el asfalto o en el hormigón, y fabricar señales de tráfico que se limpian a sí mismas.

La adición de nanopartículas al hormigón puede permitir controlar su porosidad. Reforzando al hormigón con nanotubos de carbono puede incrementarse su resistencia y evitar la propagación de grietas.

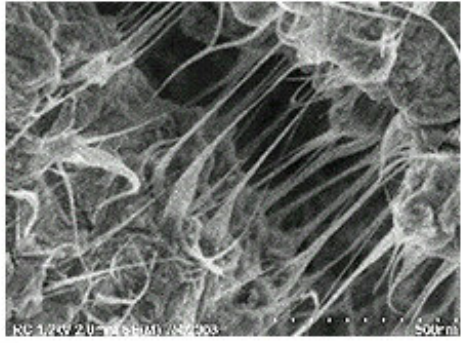


imagen de http://www.nrc-cnrc.gc.ca/highlights/2005/0506nanotech_concrete_e.html
Cemento reforzado con nanotubos de carbono que impiden la propagación de una grieta (micrografía adquirida con un microscopio electrónico de barrido).

Estudiando las características de la hoja de loto a escala nanométrica, se está aprendiendo a diseñar superficies autolimpiables. La superficie de la hoja de loto repele al agua de forma extrema; se dice que es superhidrofóbica. Las gotas de agua que se depositan sobre la hoja de loto adoptan la forma esférica y deslizan ante una pequeña inclinación, arrastrando las partículas de suciedad. Se ha podido asociar esta propiedad a la geometría nanoestructurada de la superficie. Reproduciendo esta geometría en otras superficies se pueden conseguir propiedades de "autolimpieza" similares.

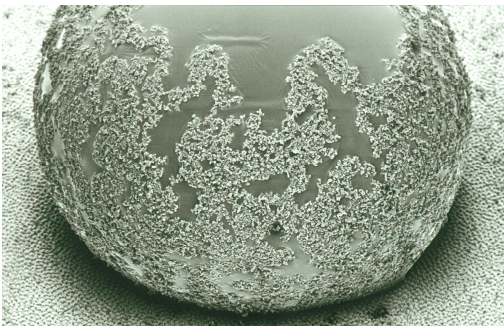


imagen de <http://www.corporate.basf.com/en/innovationen/felder/nanotechnologie/fotos/?id=V00-2Dyiw8r6Hbcp.0q>
Gota de agua que desliza sobre la superficie de una hoja de loto arrastrando la suciedad.

5. REFERENCIAS EN INTERNET

- NanoSpain: Red Española de Nanotecnología

<http://www.nanospain.org/nanospain.htm>

- Nanovip. The international nanotechnology business directory.

<http://www.nanovip.com/directory/Detailed/917.php>

- Enabling MNT (MicroNanoTechnology)
<http://www.enablingmnt.com/>

- Nanotechnology homepage of the European Commission
<http://cordis.europa.eu/nanotechnology/>

- Institute of Nanotechnology
<http://www.nano.org.uk/>

- Portal de nanotecnología para euroresidentes:
<http://www.euroresidentes.com/futuro/nanotecnologia/nanotecnologia.htm>

- National Nanotechnology Initiative
<http://www.nano.gov/>

- Foresight Nanotech Institute
<http://www.nano.org.uk/>

- NASA Center for Nanotechnology
<http://www.ipt.arc.nasa.gov/>

- Nanotechnology researchers network center in Japan
<http://www.nanonet.go.jp/english/>

- Nanochina (Nanotechnology in China)
<http://www.nanochina.cn/english/>

- South Africa Nanotechnology Initiative
<http://www.sani.org.za/>

- Nanotubes and buckyballs
<http://www.nanotech-now.com/nanotube-buckyball-sites.htm>

- Nanotechnology at BASH
<http://www.corporate.basf.com/en/innovationen/felder/nanotechnologie/>

- Nanotechnology at IBM
<http://domino.research.ibm.com/comm/research.nsf/pages/r.nanotech.html>

M^a Teresa Cuberes Montserrat
Catedrática de Ciencia de los Materiales.