



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

TÍTULO DEL TEMA

TRABAJO MONOGRÁFICO DE ACTUALIZACIÓN

**REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE NANOTECNOLOGÍA EN
REVISTAS DE DIVULGACIÓN EN ESPAÑOL**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

RUBEN MONTOYA MENDOZA

MÉXICO, D.F.



2004

**EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUÍMICA**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

Jurado asignado:

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recapcional.

NOMBRE: Rubén Montoya Mendoza

FECHA: 19/0ctubre/2004

FIRMA: 

Presidente Prof. Adela Castillejos Salazar


Vocal Prof. Plinio Jesús Sosa Fernández


Secretario Prof. Margarita Chávez Martínez

1er Suplente Prof. Jesús Gracia Mora

2º Suplente Prof. Irma Susana Rojas Tome

Sitio donde se desarrolló el tema: Facultad de Química

Nombre completo y firma del asesor del tema: Plinio Jesús Sosa Fernández 

Nombre completo y firma del sustentante: Rubén Montoya Mendoza 

ÍNDICE

PRESENTACIÓN.....	3
I. INTRODUCCIÓN.....	4
II. NANOMATERIALES.....	10
a. Generalidades.....	10
b. Materiales nanoestructurados.....	15
c. Nanotubos.....	17
– De carbono.....	19
– De otros tipos.....	28
III. PROCESOS DE FABRICACIÓN DE NANOMATERIALES.....	29
a. Técnicas más comunes de fabricación de nanomateriales.....	29
– Fotolitografía.....	31
– Litografía.....	33
– De arriba abajo y de abajo arriba.....	37
b. Fabricación de nanotubos de carbono.....	39
– Volatilización.....	39
– Horneado.....	39
– Bombardeo con láser.....	40
IV. APLICACIONES.....	42
a. En la medicina.....	42
b. En la investigación biomédica.....	43
c. En la electrónica.....	44
d. De los puntos cuánticos.....	46
e. En la actualidad.....	49
V. PERSPECTIVAS Y CONCLUSIONES.....	50
APÉNDICE I. Estructura de los materiales.....	54
a. Materiales y sustancias.....	54
b. Interacciones descritas mediante la mecánica cuántica.....	59
– Enlace covalente.....	61
– Enlace metálico.....	63

c. Interacciones descritas con modelos electrostáticos clásicos.....	66
– Interacciones iónicas (en las que participan iones).....	68
– Interacciones dipolares o de Van der Waals.....	69
APÉNDICE 2. Polímeros.....	70
APÉNDICE 3. Cerámicas.....	72
APÉNDICE 4. Carbono.....	73
APÉNDICE 5. Silicio.....	76
VI. Bibliografía.....	78

PRESENTACIÓN

Este trabajo lo realice con la finalidad de recibir el título de Ingeniero Químico y brindar a los estudiantes mayor información sobre la NANOTECNOLOGIA.

En este trabajo se presenta una revisión bibliográfica acerca de la *Nanotecnología* de revistas en español que circulan en nuestro país. La intención es reunir, sintetizar y organizar la información que existe (en español, en México) sobre el tema para que los interesados, aún sin el dominio del inglés, puedan obtener a partir de un solo documento un panorama general de esta rama de la ciencia que ya ahora está teniendo un enorme impacto en la sociedad y que, seguramente, lo tendrá aún mayor en el futuro cercano.

Las revistas consultadas fueron:

- Ciencia
- ¿Cómo ves?
- Avance y Perspectiva
- Conozca más
- Educación química
- Investigación y Ciencia
- Mundo Científico
- Muy Interesante

En el capítulo I, se hace una presentación muy general del tema: qué se entiende por nanotecnología y cuál es su importancia en la actualidad.

En el capítulo II, se aborda de manera específica las características y propiedades más importantes de los nanomateriales.

En el capítulo III, se describen los distintos métodos de fabricación de los nanomateriales.

En el capítulo IV se mencionan las diferentes aplicaciones de la nanotecnología.

Para cerrar el trabajo, en el capítulo V, se discute las apasionantes perspectivas de esta nueva rama de la ciencia.

Finalmente, en los apéndices se concentra información pertinente y necesaria para la mejor comprensión del tema.

I. INTRODUCCIÓN

Aunque no existe una definición precisa de lo que significa nanotecnología, se refiere a los conocimientos científicos así como a la capacidad tecnológica para controlar el tamaño y forma, a nivel atómico y molecular, de una amplia gama de materiales.

En diciembre de 1959, el famoso físico y Premio Nóbel Richard Feynman impartió una conferencia "Hay mucho espacio en el fondo" ("There's Plenty of Room at the Bottom") para la American Physical Society en la cual planteó el problema de manipular y controlar cosas a escala muy pequeña, más allá de la miniaturización. Feynman señalaba que no había nada en las leyes de la física que impidiera construir estructuras colocando átomo por átomo, en una forma específica.

En la naturaleza, este proceso ocurre desde hace mucho tiempo: todos los seres vivos se construyen átomo por átomo siguiendo las instrucciones del ADN correspondiente.

Feynman dijo: la biología no es simplemente escribir información; es hacer algo con ella. Un sistema biológico puede ser extremadamente pequeño. Muchas de estas células son muy pequeñas, pero están muy activas, fabrican diversas sustancias y hacen toda clase de cosas maravillosas, todo a escala muy pequeña. Además almacenan información dando cabida a la posibilidad de que también nosotros podamos construir una cosa muy pequeña que haga lo que queramos, que podamos fabricar un objeto que maniobre a ese nivel.

Feynman enfatizó que las estructuras pequeñas deben presentar propiedades y fenómenos muy diferentes a los cotidianos. No hay que olvidar que todo lo que sucede en el mundo de lo pequeño es fruto de la mecánica cuántica.

Feynman planteó como ejemplo para ilustrar lo que significaría un cambio de escala, escribir toda la enciclopedia británica (24 tomos) en la cabeza de un alfiler. Para hacerlo habría que reducir la escritura 25,000 veces, es decir llegar al tamaño de unos 32 átomos. *¿cómoves?(Tagueña y del Río, 2003)*.

Pasaron muchos años sin que los planteamientos de Feynman se hicieran realidad. Para poder escribir y leer letras del tamaño que este científico propuso, faltaba desarrollar una tecnología nueva: microscopios con enorme capacidad de amplificación que detectaran átomos y además pudieran manipular esos átomos.

Unos 15 años después de la conferencia de Feynman, el científico japonés Norio Taniguchi introdujo el término *nanotecnología*. Recordemos que la tecnología es la actividad humana que genera herramientas o procesos mediante la aplicación de los conocimientos científicos para el desarrollo económico de una sociedad. En cuanto a *nano*, es sinónimo de enano y viene del latín *nanus* que significa pequeñez excesiva.

Nano aparece como prefijo en las unidades del Sistema Internacional para referirse a la mil millonésima parte de la unidad respectiva (milésima parte de un millonésimo, 10^{-9}). Nanotecnología hace referencia al trabajo que se realiza en el intervalo de 0.1 a 100 nanómetros (nm). Para tener una idea más clara del intervalo de acción de la Nanotecnología, reflexionemos sobre lo siguiente: los

radios de los átomos miden aproximadamente una décima parte de un nanómetro, los átomos son 10,000 veces más pequeños que una bacteria, una bacteria es 10,000 más pequeña que un mosquito y un cabello humano tiene 10,000 nanómetros de ancho.

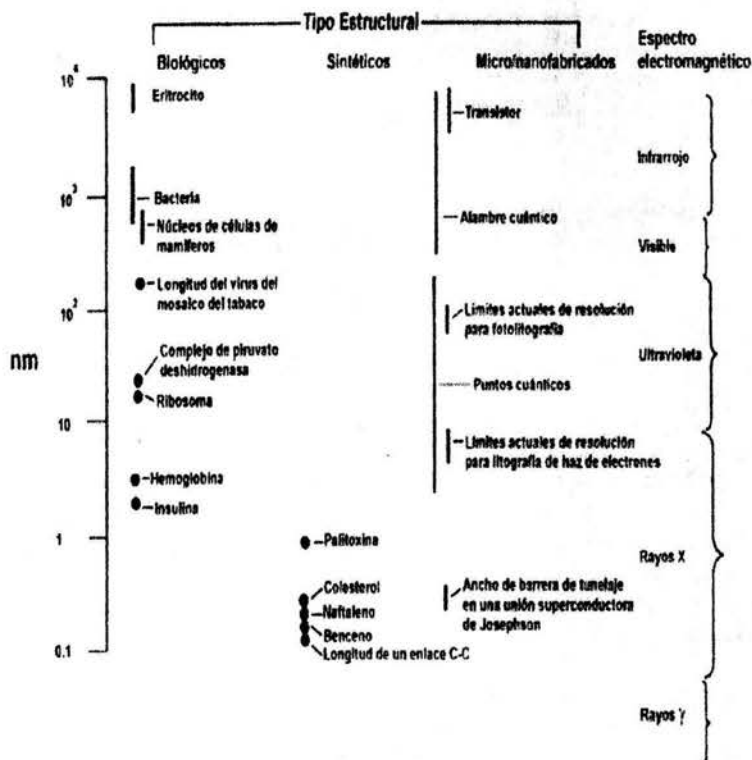


Figura 1. Comparación de tamaños relativos de diferentes estructuras.

En 1989, investigadores de la IBM asombraron al mundo colocando 35 átomos del elemento xenón sobre una superficie de níquel para copiar a nanoescala el logotipo de su compañía. Por primera vez la humanidad colocaba átomos a su gusto.

El interés por la nanotecnología se retomó en 1992, cuando Eric Drexler presentó un documento sobre la nanotecnología molecular al senado de los Estados Unidos. Ese documento fue la clave para que al iniciar este milenio el gobierno de ese país hiciera una fuerte inversión en la Iniciativa Nacional de Nanotecnología, que para 2003 podría alcanzar los 700 millones de dólares.

En su libro *La nanotecnología: el surgimiento de las máquinas de creación* (Editorial Gedisa, Barcelona, 1993), Drexler describe como construir moléculas manipulando átomos por medio de máquinas tan pequeñas como los átomos

mismos, imitando a las estructuras vivas que tienen integradas sus instrucciones y máquinas de crecimiento. En la actualidad, Drexler es el director del Foresight Institute, una organización educativa desde donde continúa el análisis de problemas de política científica de esta nueva tecnología.

Los últimos quince años hemos sido testigos de la explosión de herramientas relativamente baratas para interrogar y manipular materiales a escala de los nanómetros, tales como microscopios de exploración y sondeo, teléfonos celulares y computadoras portátiles.

Al mismo tiempo, varios campos antes no relacionados, tales como la ingeniería eléctrica y la biología han empezado a enfocarse a entender y controlar fenómenos físicos y químicos en esta escala de longitudes, típicamente de 1 a 100 nm.

Un aspecto clave de la nanotecnología es que las propiedades físicas y químicas de los materiales a nanoescala son diferentes que las del mismo material en bulto (o sea a escala macroscópica) y que esas propiedades pueden formar la base de nuevas tecnologías. Por ejemplo, los científicos han descubierto que las propiedades electrónicas y ópticas de las partículas con nanotamaño pueden variar ajustando su longitud. Así, cuando el oro se reduce a barras del tamaño de los nanómetros, su intensidad fluorescente se eleva diez millones de veces. La longitud de onda de la luz emitida se incrementa linealmente con el cuadrado de dicha longitud.

En la microelectrónica se ha reducido enormemente el tamaño (miniaturización), pero un transistor, por ejemplo, sigue teniendo millones de átomos y podemos verlo sin necesidad de un microscopio. La nanotecnología, en cambio, maneja átomos individuales, que no podemos ver.

Los microcircuitos electrónicos se miden en micrómetros, esto es, millonésimas de metro. En cambio, las nanoestructuras se miden en nanómetros, una unidad mil veces menor.

En la nanotecnología ya se están construyendo nanocircuitos y nanomáquinas que cambiarán nuestro mundo de una manera que apenas vislumbramos. Por ejemplo, un nanorrobot podría entrar al cuerpo humano a destruir células cancerosas y un nanocircuito podría ser el componente principal de un audífono insertado en el oído humano.

La capacidad para manipular átomos a voluntad es la base de la nanotecnología y esta habilidad se ha desarrollado increíblemente en la última década. Un ejemplo natural de lo que pasa cuando se colocan los mismos átomos en forma diferente es el del grafito y el diamante. Ambos están compuestos por átomos de carbono, pero la colocación de estos átomos es diferente.

En el caso del diamante los átomos forman estructuras tetraédricas, mientras que en el grafito, los átomos se encuentran colocados en las esquinas de hexágonos y forman capas laminares. El diamante es transparente y muy duro, el grafito es negro y suave.

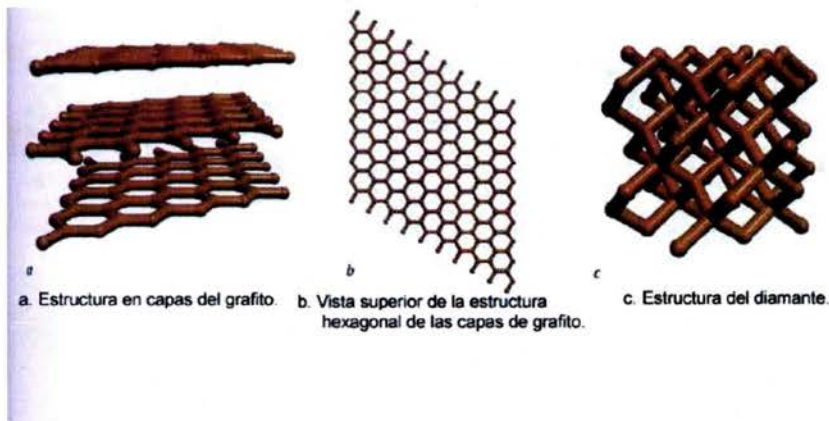


Figura 2. Estructura reticular de las dos formas alotrópicas más comunes del carbono.

En los seres vivos, las proteínas funcionan como nanomáquinas en las células vivas. Son máquinas moleculares con relativamente pocos átomos, que construyen a su vez otras moléculas. Los ingenieros genéticos han aprendido este camino y cultivan bacterias específicas para hacer proteínas al gusto.

La posibilidad de construir estructuras diminutas de unos cuantos átomos empieza a modificar desde las computadoras hasta la atención a la salud. Se calcula que en la próxima década habrá un salto de la macro a la nanoescala y los gobiernos de diversos países establecen planes para apropiarse de esta nueva revolución tecnológica.

Las grandes compañías ya invierten grandes cantidades de dinero y tiempo en nanotecnología. Muchas universidades están dedicando un gran esfuerzo al estudio de las pequeñas estructuras del tamaño de nanómetros con propiedades espectaculares.

En México hay diversos grupos dedicados a ello y se habla de crear una red nacional en esta línea de investigación. Claro está que siendo las universidades tan sólo fuentes generadoras de conocimiento, se requiere que el gobierno y la industria mexicana establezcan un programa para fomentar la nanociencia y la nanotecnología.

Hay dos caminos para construir nanoestructuras. En uno se va de nuestra escala a la escala atómica, quitando átomos hasta llegar al tamaño deseado, por ejemplo para hacer silicio poroso a partir de un trozo de silicio (de arriba hacia abajo). El silicio es un elemento muy abundante en las arenas de nuestro planeta, ha sido el principal protagonista de la revolución electrónica del siglo XX: es el componente fundamental de transistores y chips de computadoras y al parecer también tendrá un importante papel en la nanotecnología. Fue una sorpresa descubrir que como nanoestructura el silicio poroso es luminiscente, lo que abre nuevas posibilidades de aplicación de este material en el campo de la óptica.

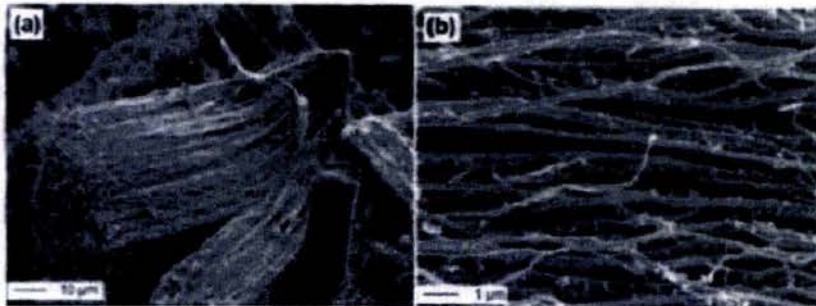
En el otro camino, se construyen nanoestructuras a partir de la escala atómica. Un ejemplo son los nanotubos de carbono, estructuras 20 veces más resistentes que el acero, y excelentes conductores del calor y la electricidad. Estos nanotubos son redes hexagonales, tipo grafito y curvadas, de aproximadamente 200 átomos de carbono; tienen de 30 a 80 nanómetros de diámetro y longitudes de 250 nanómetros. El tema de los nanotubos es un tema que se está investigando actualmente en México.



Figura 3. Estructura reticular de un nanotubo de carbono.

Los nanotubos podrían utilizarse como sensores en el monitoreo ambiental de la calidad del aire, ya que con ellos es posible identificar ciertas moléculas gaseosas. Otra aplicación sería como nanodispositivos electrónicos, por ejemplo puntas de microscopio de tunelaje.

La habilidad de producir manojos de nanoalambres muy densos y muy compactos, abre muchas posibles aplicaciones de láseres ultradelgados. Estos láseres son mil veces más delgados que un cabello humano y se producen a partir de un manajo de nanoalambres de óxido de zinc de 20 a 150 nanómetros de diámetro y unas 10 micras de longitud (una micra es la millonésima parte de un metro).



Fotografías de microscopio electrónico de barrido. En la foto a) se observa gran cantidad de nanotubos de carbono y en la foto b) se aprecia un detalle de su grosor.

Figura 4. Nanotubos de carbono observados mediante un microscopio electrónico de barrido.

Las celdas solares, que convierten la energía solar en eléctrica, son otro campo en el que se esperan grandes cambios.

La combinación de plásticos electrónicos (plásticos que conducen la electricidad) y nanotecnología ha posibilitado una nueva generación de celdas solares. Nanobastones de seleniuro de cadmio, con diámetros de siete nanómetros y longitudes de apenas 60 nanómetros, se unen a un plástico electrónico, con lo que se obtiene una celda solar flexible.

El beneficio de estos bastones es que dan una trayectoria preferencial para el movimiento de los electrones y por lo tanto incrementan la eficiencia de la celda solar.

También se han hecho grandes avances en dispositivos mecánicos y electrónicos cada vez más pequeños en el área de la medicina. El marcapasos cardiaco ha salvado muchas vidas y existen implantes basados en silicio para tratar parálisis, sordera, ceguera y desórdenes neuronales. Pero las nanoestructuras han dado un nuevo giro a estas aplicaciones, y nos acercan a otro de los planteamientos de Feynman en aquella histórica conferencia de 1959.

El envío selectivo de nanoestructuras a lugares específicos como el corazón y otros órganos vitales ayudará también en el tratamiento de intoxicaciones y envenenamientos por drogas y pesticidas. Las nanoestructuras serían como cápsulas diminutas en cuyo interior iría el fármaco. Éste se liberaría cuando la nanoestructura recibiera cierto estímulo del propio organismo, incluso a tiempos diferentes dependiendo de cuando se requiera. Las nanocápsulas serían muy útiles en anestesiología.

Muchos investigadores dudan de las posibilidades reales de construir un nanorrobot. Los detractores de esta idea plantean que un nanorrobot que se dedique a colocar átomos no tendría suficiente espacio para la manipulación.

Otros, en cambio, están preocupados por la posibilidad de que se creen nanorrobots capaces de autorreplicarse. Consideran que debería hacerse una reglamentación estricta como en biotecnología, pues estas máquinas fuera de control podrían ser semejantes a virus que se replicaran, consumiendo todo a su paso.

De momento nadie ha sido capaz de hacer un nanorrobot autorreplicable. Y si pensamos en virus tampoco lo ha logrado la naturaleza, ya que los virus que están en la nanoescala sólo se pueden reproducir cuando están unidos a células vivas.

Todo tema científico de frontera despierta polémica y es muy importante que la sociedad actual tenga una educación lo más completa e informada posible para enfrentar los retos de los avances científicos y tecnológicos.

II. NANOMATERIALES

a. Generalidades

Las propiedades de los materiales son muy distintas dependiendo de la magnitud de las interacciones entre sus partículas y del tamaño de los bloques que se estabilizan. Por ejemplo, el estado físico de los materiales donde se tienen partículas aisladas (de tamaño subnanométrico) que prácticamente no interactúan entre sí siempre es el gaseoso. En el otro extremo, el estado físico de los materiales donde se forman inmensas redes de partículas interactuando muy fuertemente entre sí —es decir, bloques enormes de tamaño macroscópico—, siempre es sólido. Dicho de una manera muy gruesa: bloques del tamaño de las partículas químicas (10^{-10} m) dan lugar a materiales gaseosos; bloques de tamaño macroscópico (1mm en adelante) dan lugar a materiales sólidos¹.

La nanotecnología ha permitido crear materiales constituidos por bloques de un tamaño intermedio, entre 1 y 1,000 nanómetros, que en este trabajo vamos a llamar nanopartículas. No es de sorprender que presenten propiedades muy distintas tanto de los materiales moleculares como de los reticulares. Los nanomateriales (materiales que consisten de nanopartículas) permiten aplicaciones que no serían posibles ni con los materiales moleculares ni con los reticulares.

Las propiedades físicas y químicas de un material están determinadas, entre otros factores, por el espacio donde puedan moverse los electrones. Debido al confinamiento espacial, la diferencia entre los niveles energéticos asociados a los electrones ensanchan. También la proporción de superficie a volumen se ve notablemente aumentada. Por eso, las nanopartículas presentan propiedades distintas a las de los materiales típicos (moleculares y reticulares).

El tamaño exacto de una nanopartícula para que puedan aparecer nuevas propiedades depende de la naturaleza del material y de cierta *longitud característica*. Generalmente, cuando el tamaño de la partícula resulta ser menor o comparable a esta longitud característica es cuando podemos esperar un comportamiento que difiere de aquél en un *material bulto* (es decir, macroscópico). Por ejemplo, en un metal la longitud característica puede ser el llamado “camino libre medio” de los electrones (la distancia promedio que recorren libremente los electrones entre colisiones). En cambio, en un semiconductor, sería la distancia entre un par electrón-hueco. En cualquier caso, dado el material y el fenómeno en cuestión, existirá una distancia característica de interacción, la cual se verá afectada al reducir el tamaño del sistema. *Ciencia(Mendoza, 2003)*.

Aparte del tamaño de las nanopartículas, también resulta relevante lo que podemos llamar su dimensionalidad geométrica. Idealmente podemos tener nanopartículas bidimensionales cuando algunas de las dimensiones es mucho

¹ En los materiales líquidos, se tienen partículas aisladas pero interactuando ya de manera considerable.

menor que las otras dos, como ocurre en las capas delgadas o plaquetas. Los nanotubos o nanoalambres pueden considerarse como sistemas unidimensionales cuando su diámetro es del orden de nanómetros.

Las nanopartículas esféricas o aquellas en que, en cualquier dirección en que se miren sus dimensiones son del orden de nanómetros, pueden considerarse como “cero dimensionales”, también conocidas, en una terminología alternativa, como “puntos cuánticos”. *Educación Química*(Castellanos, 2003)

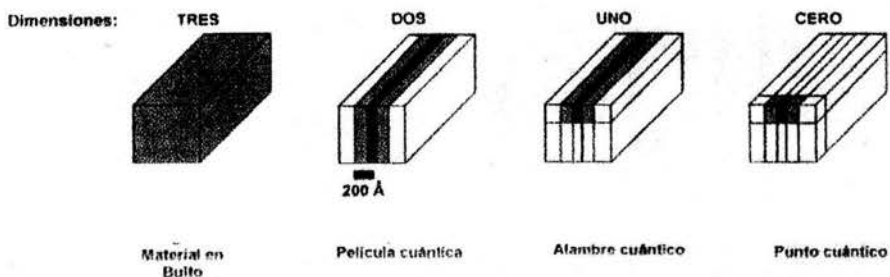


Figura 5. Dimensionalidad de nanomateriales.

Los nanomateriales pueden tener propiedades superiores a las de su contraparte de mayor tamaño o incluso presentar propiedades totalmente distintas. Las propiedades de mayor interés son las mecánicas, magnéticas, electrónicas, ópticas y catalíticas, entre otras.

Desde el punto de vista tecnológico, las aplicaciones potenciales de los nanomateriales incluyen usarlos como pigmentos para pinturas, en productos farmacéuticos, como catalizadores, en baterías, celdas de combustible, dispositivos electrónicos y ópticos, memorias magnéticas de alta capacidad de almacenamiento, biomateriales, recubrimientos protectores, etc. Un hecho sobresaliente es que, en los materiales de interés, las diferentes propiedades pueden ser controladas variando el tamaño de las nanopartículas, de manera que las propiedades particulares del material pueden ajustarse al tipo de aplicación o al fenómeno que se desea estudiar.

De esta forma, gran parte del interés en las nanopartículas radica también en el estudio de las propiedades básicas que se presentan al pasar desde el nivel atómico o molecular hasta el material en bulto, es decir, en porciones de mayor masa y dimensiones.

Por ejemplo, es conocido que el paladio en bulto no es ferromagnético, pero las predicciones teóricas indican que cuando se reduce la dimensionalidad del sistema, ya sea a dos dimensiones o a nanocúmulos, el paladio debería volverse ferromagnético. Recientemente se ha encontrado evidencia experimental de que efectivamente esto ocurre en nanopartículas de paladio.

Propiedades eléctricas y magnéticas

El sodio en bulto no presenta ferromagnetismo. Sin embargo, para nanoalambres de sodio se predice un comportamiento ferromagnético para ciertos radios de nanoalambre. De confirmarse experimentalmente esta predicción, éste sería uno de los primeros sistemas donde se observará ferromagnetismo básicamente proveniente de electrones libres. Entre las propiedades de transporte de los nanomateriales, podemos mencionar el incremento del parámetro conocido como *mérito termoeléctrico* y la existencia de una magnetorresistencia gigante en nanoalambres de bismuto. También se ha visto el incremento de la temperatura crítica a la que el material se vuelve superconductor en nanopartículas en geometría de confinamiento, como es el caso del indio embebido en matrices de vidrio nanoporoso. De hecho cuando se tiene indio confinado en matrices nanoporosas, su temperatura crítica superconductor se incrementa 20 % respecto a su valor de bulto. En el platino en bulto no se han encontrado evidencias de superconductividad hasta las temperaturas más bajas accesibles experimentalmente; pero en estudios recientes en polvos finos de platino compactados se ha encontrado superconductividad a temperatura de alrededor de 1 kelvin; esto tal vez es debido al cambio de los modos de vibración de los átomos dentro de las partículas muy pequeñas. *Ciencia(Mendoza, 2003)*

El plomo parece ser un elemento excelente para estudiar las propiedades superconductoras de los nanoalambres en geometría de confinamiento porque su temperatura crítica superconductor es relativamente alta (7.2 K), es un material bien estudiado en bulto y porque la ruta de síntesis para los nanoalambres ha resultado relativamente simple. Ya se ha dado un primer paso en esta dirección con la síntesis de nanoalambres de plomo con diámetro de 25 nanómetros. Por otro lado, el azufre es un material con propiedades eléctricas de aislante y se presenta en toda una variedad de formas alotrópicas (formas alternativas de un mismo elemento químico, con distintas propiedades).

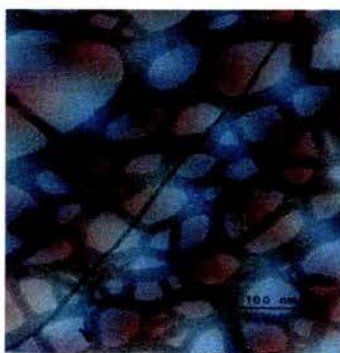


Figura 6. Fotografía de un nanoalambre de azufre.

Una propiedad novedosa que se ha descubierto recientemente es que el azufre sometido a grandes presiones sufre una transición del estado aislante a un estado metálico, conductor de la electricidad. Al aumentar aún más la presión externa, el azufre pasa del estado metálico a un estado superconductor. La temperatura crítica de la transición del azufre (aproximadamente 17 K) es la temperatura más alta conocida sustancia elemental.

Los nanotubos de carbono (fullerenos orgánicos) pueden tener un comportamiento semiconductor o metálico dependiendo básicamente de factores geométricos. Recientemente se ha detectado comportamiento superconductor a bajas temperaturas.

Propiedades ópticas

Respecto a las propiedades ópticas, se ha observado que el espectro de absorción óptica de nanopartículas de oro se comporta en forma cuántica dependiendo de su tamaño, y en otros materiales, como el buckminsterfullereno, C_{60} , depende del tipo de empaquetamiento de las moléculas dentro de los cúmulos nanométricos. Por otro lado, en semiconductores típicos, como el silicio, se ha logrado un incremento notable de la fotoluminiscencia (emisión de luz) a temperatura ambiente en nanopartículas embebidas en matrices aislantes. También se ha logrado exitosamente sintetizar nanoalambres de silicio, material que podría presentar novedosos fenómenos físicos asociados a su dimensionalidad reducida y posibles aplicaciones en dispositivos electrónicos a nivel nanoscópico, tales como detectores de muy alta sensibilidad para sustancias químicas.

El mismo tipo de sistemas ha logrado producirse con el óxido de silicio, material íntimamente relacionado al silicio en la moderna tecnología electrónica, donde se ha observado una intensa luminiscencia en la región azul del espectro visible. La intensidad de emisión de luz obtenida de los nanoalambres de óxido de silicio es superior a la obtenida con el silicio poroso, material considerado como el idóneo para su empleo en la tecnología moderna de la integración optoelectrónica.

Preparación

Un método experimental que recientemente ha recobrado interés, por su versatilidad y su sencillez técnica para producir material en forma de nanoalambres es la denominada técnica del molde (template en inglés), que consiste en emplear como molde algún material con cavidades nanoscópicas, las cuales se rellenan con el material de interés. En particular, el óxido de aluminio nanoporoso obtenido por técnicas de anodización electrolítica tiene canales paralelos entre sí, con diámetros que pueden variarse a voluntad, dependiendo de las condiciones de anodización. La característica principal del óxido de aluminio nanoporoso es que se obtienen canales con diámetros que pueden ir desde algunos nanómetros hasta micrómetros. Empleando las sustancias químicas adecuadas como precursoras y tratamientos térmicos adecuados (en su caso), es posible sintetizar toda una variedad de materiales en forma de nanoalambres. En algunos casos puede disolverse el molde sin afectar a los nanoalambres, dejándolos libres

para estudiar su estructura. En otros, los nanoalambres quedarán confinados dentro del óxido de aluminio nanoporoso. Este último caso puede ser de utilidad en estudios *in situ* de los materiales bajo confinamiento.

Estructura cristalina

En general, una característica que se ha observado en nanopartículas aisladas o en geometría de confinamiento es que tienen estructuras cristalinas diferentes a las de su contraparte en bulto. Este efecto se ha observado tanto en nanoalambres de plomo aislados, como en plomo y cromo confinados dentro de nanotubos de carbono, o en galio confinado en vidrios nanoporosos. En nanopartículas de paladio y platino también se han observado estructuras cristalinas distintas a la del material en bulto. Estudios de microscopía electrónica indican que la estructura cristalina de los nanoalambres de plomo es diferente a la del plomo “en bulto”.

Mediante la técnica del molde de óxido de aluminio nanoporoso se realizó el trabajo experimental para lograr la síntesis y el estudio estructural, por medio de microscopía electrónica de alta resolución, de los siguientes sistemas: plomo, disulfuro de molibdeno y azufre.

El primer resultado sorprendente que se ha observado es que, al liberarse de la matriz del óxido de aluminio, los nanoalambres de azufre se curvan en escalas de nanómetros. Esto podría indicar que los nanoalambres en confinamiento están sometidos a intensos esfuerzos, y que al liberarse del confinamiento dichos esfuerzos actúan de manera que la forma recta de los nanoalambres se transforman a una forma curva.

Lo anterior puede ser un buen indicio de que las propiedades físicas y químicas del azufre en geometría de confinamiento sean diferentes a las propiedades en bulto. De hecho, los estudios estructurales realizados en los nanoalambres de azufre muestran que poseen una estructura cristalina diferente a las fases estables del azufre conocidas hasta la fecha.

Un proyecto interesante sería encapsular azufre puro dentro de nanotubos de carbono. Se predice que el confinamiento de azufre dentro de estos nanotubos puede inducir propiedades físicas novedosas, principalmente porque los nanotubos de carbono en sí mismos las presentan y porque en otros trabajos se ha detectado azufre dentro de nanotubos de carbono que tienen una estructura cristalina que coincide con una fase que sólo aparece a altas presiones.

Experimentos preliminares realizados con este sistema indican que se trata de un material con alta conductividad eléctrica y comportamiento magnético interesante; pero todavía hace falta realizar más experimentos para buscar un posible comportamiento superconductor en estos novedosos materiales.

Posibles aplicaciones tecnológicas

Dentro de los sistemas nanométricos anteriormente mencionados, los nanomateriales que se aproximan a nanotubos o nanoalambres son de especial interés, tanto por sus novedosas propiedades físicas, como por sus posibles aplicaciones tecnológicas.

Algunas propuestas interesantes de aplicaciones tecnológicas de los nanotubos de carbono consisten en emplearlos como puntas para realizar nanolitografía, como dispositivos rectificadores o como nanotransistores, trabajando a temperatura ambiente con un solo electrón. Recientemente también se logró sintetizar nanotubos híbridos a base de carbono y nitrógeno, y se extendió la síntesis de nanotubos con otros compuestos no orgánicos (fullerenos inorgánicos), por ejemplo, fullerenos a base de disulfuro de molibdeno, disulfuro y óxido de tungsteno, e incluso sistemas más complejos, como nanotubos de tungsteno-molibdeno-carbono-azufre.

Los sistemas mencionados anteriormente poseen estructura hueca; pero ya han sido sintetizados también nanoalambres con estructura compacta de otros materiales, por ejemplo bismuto, silicio, óxido de silicio, plomo, cromo, hierro y aún de cerámicas superconductoras, entre otros materiales.

b. Materiales nanoestructurados

Aparte del estudio de las propiedades de las nanopartículas en sí mismas, también resulta de gran interés estudiar conglomerados de ellas. Así, hablamos de "materiales nanoestructurados" cuando se tiene un aglomerado de nanopartículas en contacto directo entre sí. Las propiedades de los materiales nanoestructurados estarán determinadas por las propiedades intrínsecas de las nanopartículas y la interacción entre ellas.

Los materiales nanoestructurados se definen como materiales con un tamaño de grano de menos de 100 nm, es decir, cualquier material que contenga partículas, láminas o filamentos de menos de 100 nm. Dependiendo de la naturaleza de la matriz, los *nanocompuestos* pueden ser clasificados dentro de tres grupos principales:

- Poliméricos
- Metálicos
- Cerámicos

Debido al tamaño tan pequeño de la unidad estructural (partícula, grano o fase) y a la gran relación superficie-volumen, los materiales nanoestructurados presentan un comportamiento único comparado con el de los materiales a escala micrométrica.

Muchas de las investigaciones de las últimas décadas se han dedicado a los materiales nanoestructurados, debido a que han dado lugar al desarrollo de materiales avanzados con nuevas y mejores propiedades. Factores estructurales,

como dimensionalidad, composición y propiedades de interfase tienen gran influencia en su comportamiento.

El primero de estos factores, la dimensionalidad, implica el tamaño y la distribución, así como la morfología. La composición química de las fases constituyentes se relaciona directamente con el uso final de los materiales, que requieren un manejo y proceso específicos. En el comportamiento del material también se deben de tomar en cuenta la composición y la pureza de las fases, así como la estequiometría en la combinación de las mismas. El tercer factor estructural importante consiste en el número y la naturaleza de las interacciones entre las fases constituyentes, ya que el número de interfases en materiales nanoestructurados suele ser elevado. Se deben considerar todos estos factores en la preparación de estos materiales.

Los nanomateriales, en general, son una combinación de dos o más fases, que contienen diferentes composiciones o estructuras, donde al menos una de las fases está en la escala nanométrica. Estos materiales exhiben conductas diferentes con relación a los *materiales compuestos*² convencionales que presentan estructuras a microescala, debido principalmente al pequeño tamaño de la unidad estructural y a la gran relación superficie-volumen.

Las propiedades de los *materiales compuestos* están influidas fuertemente por el grado de mezclado entre las fases. Además, debido a que generalmente los constituyentes son inmiscibles, se obtienen *microcompuestos* pobremente mezclados con fases químicamente distintas generando pequeñas, sino es que nulas, atracciones físicas entre los componentes orgánicos, produciendo materiales más débiles. Además, las partículas de tamaño micrométrico actúan como concentradores de esfuerzos. Por otro lado, en *nanocompuestos*, los materiales químicamente diferentes son combinados a escala nanométrica y son muy pequeños para producir concentraciones de esfuerzos.

También, la estructura de los *nanocompuestos* depende del grado en el cual los componentes orgánicos e inorgánicos son transformados en compatibles. Teniendo interacciones más fuertes entre polímero y silicato se producen, por lo tanto, materiales con propiedades mecánicas superiores.

La síntesis de *nanocompuestos* involucra un proceso de varios pasos. Sin embargo, el paso crítico en la elaboración de *nanocompuestos* con una dispersión homogénea es el lograr una buena compatibilización entre las fases para lo cual se requiere una adecuada comprensión de la química de superficies e interfases.

Existen muchos procesos y métodos de síntesis que han sido utilizados para la elaboración de *nanocompuestos*. Estos métodos pueden ser clasificados en físicos y químicos, aunque muchos métodos de preparación se basan en más de un principio y el límite entre ellos puede ser muy difuso. Se han utilizado métodos físicos como la condensación en estado gaseoso, deposición por rocío, síntesis de plasma, entre otros. Mientras que los métodos químicos más utilizados son el

² Aquí la palabra *compuesto* se refiere a que tiene varios componentes y no a una *sustancia compuesta* como se usa normalmente en química.

proceso sol-gel, deposición química en fase vapor, pirólisis polimérica, pirólisis láser, descomposición química y sonoquímica, entre otras técnicas.

Actualmente una nueva técnica para preparar *nanocompuestos* polímero-cerámicos es insertar cadenas poliméricas entre pequeñas láminas de arcillas o en materiales laminados. Las arcillas son los mejores aditivos porque pueden ser intercalados con moléculas orgánicas y polímeros. Se han reportado una gran variedad de *nanocompuestos* polímero-cerámicos preparados por diversas técnicas de intercalación.

Los *materiales compuestos* nanoestructurados orgánicos-inorgánicos típicamente exhiben propiedades mecánicas superiores a otros materiales. El tamaño de las partículas inorgánicas puede ser controlado y las propiedades interfaciales pueden ser mejoradas provocando enlaces covalentes o interacciones entre las fases orgánica e inorgánica. Algunas nanopartículas han sido preparadas *in situ* durante el proceso, la técnica sol-gel ha sido aplicada para producir este tipo de *nanocompuestos*. Sin embargo, una ruta mas atractiva de formación de *nanocompuestos* con nanopartículas es la intercalación de arcillas organofílicas. Las arcillas también se usan como una alternativa de componentes inorgánicos para la construcción de *nanocompuestos* híbridos ya que poseen enlaces Si-O estables y relaciones de longitud/espesor muy altos. La superficie de sus láminas puede ser modificada y su red tridimensional puede ser intercalada por polímeros. Ésta es una de las tecnologías mas comúnmente utilizadas por varios investigadores ya que los silicatos laminados, como las arcillas, son minerales con gran disponibilidad.

No obstante, hay una gran cantidad de nanopartículas que pueden utilizarse como cargas o refuerzos en matrices poliméricas. Además de las arcillas naturales y sintéticas, se pueden encontrar nanopartículas como silsesquioxanos poliédricos o los nanotubos de carbono. También se ha utilizado el negro de humo, el cual tiene tamaños de partícula por debajo de 50 nm, en la formulación de llantas, tuberías, selladores, etc. Los más nuevos son polvos de metal como los óxidos, nitruros o carburos.

c. Nanotubos

Los nanotubos son redes hexagonales, tipo grafito y curvadas, de aproximadamente 200 átomos generalmente de carbono; tienen de 30 a 80 nanómetros de diámetro y longitudes de 250 nanómetros.

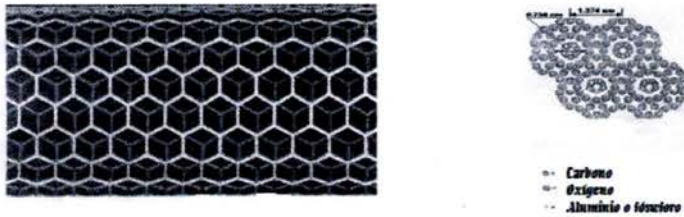


Figura 7. Dos vistas de la estructura de los nanotubos de carbono.

En 1991 Sumio Iijima, en el Laboratorio de Investigación Fundamental de la Corporación Electrónica Japonesa (NEC) en Tsukuba, observó unas extrañas fibras nanoscópicas depositadas sobre una mota de hollín, constituidas por carbono, de forma tan regular y simétrica como la de los cristales. Estas macromoléculas de primorosa finura e impresionante longitud no tardaron en llamarse *nanotubos* desde entonces han sido objeto de una intensa investigación. *Investigación y Ciencia* (Collins y Avouris, 2001).

Muchas de las propiedades extraordinarias de los nanotubos como: elasticidad superlativa, resistencia a la tracción y estabilidad térmica han despertado la imaginación, que sueña con robots microscópicos, carrocerías de automóviles resistentes a los impactos y edificios a prueba de terremotos. Sin embargo los primeros productos que incorporan nanotubos no lo hacen por estas propiedades, sino en virtud de sus propiedades eléctricas.

Algunos automóviles de General Motors incluyen piezas de plásticos a las que se le añaden nanotubos. El material plástico se carga eléctricamente durante la fase de pintura para que ésta se adhiera mejor. Pronto saldrán al mercado dos productos de iluminación y presentación visual basados en nanotubos.

A largo plazo, las aplicaciones más valiosas serán en cuanto a las propiedades electrónicas de los nanotubos.

Por ejemplo, los nanotubos de carbono pueden desempeñar el mismo papel que cumple el silicio en los circuitos electrónicos, pero a escala molecular, donde el silicio y otros semiconductores dejan de funcionar.

Aunque la industria electrónica está llevando las dimensiones críticas de los transistores de los chips comerciales por debajo de 200 nanómetros, los ingenieros se enfrentan con grandes obstáculos para avanzar en la miniaturización.

En unos 10 o 20 años, los materiales y los procesos sobre los que se ha basado la revolución informática comenzarán a alcanzar su límite físico infranqueable.

Los experimentos de los últimos años han dado esperanza a los investigadores de que podrían fabricarse con nanotubos las conexiones y los dispositivos activos de un tamaño de 10 nanómetros o inferior. Incorporados los nanotubos en circuitos

electrónicos, éstos operarían más de prisa y sin consumir tanta energía como los actuales.

Los primeros nanotubos que observó Lijima en 1991 se denominaron tubos de paredes múltiples. Cada uno contenía cierto número de cilindros huecos de átomos de carbono anidados unos tras otros

Dos años después, Lijima y Donald Bethune, éste de IBM, crearon cada uno por su lado nanotubos de pared única, formados exclusivamente de una capa de átomos de carbono. Ambos tipos de tubos, fabricados de modo parecido, gozan de muchas propiedades similares; las más obvias, su longitud y estrechez, enormes.

Los principales nanotubos son los de carbono aunque también se conocen otros como los de nitruro de boro y los de disulfuro. En las siguientes secciones analizaremos cada uno de ellos.

- De carbono

Los nanotubos de carbono, sin duda son los más importantes y los que más se han estudiado. Por esta razón, analizaremos con más detalle tanto sus propiedades como sus métodos de fabricación así como sus aplicaciones.

Lo que confiere a este tipo de nanotubos su estabilidad notable es la intensidad con que se unen los átomos de carbono entre sí, propiedad que explica la dureza del diamante. En este mineral, los átomos de carbono se unen en un tetraedro de cuatro lados. Sin embargo, en los nanotubos los átomos se disponen en anillos hexagonales, la misma estructura que caracteriza al grafito; de hecho un nanotubo parece una lámina de grafito enrollada como un cilindro sin costura.

La composición y la geometría de los nanotubos de carbono crean, con independencia de su formación, una complejidad electrónica única. Esto se debe en parte, al tamaño, pues no olvidemos que la física cuántica manda a escala nanométrica.

De hecho, el propio grafito se considera como un material especial. Si la mayoría de los conductores eléctricos son metales o semiconductores, el grafito pertenece al grupo restringido de los semimetales, ubicado entre la zona de transición entre aquellos.

Combinando las propiedades semimetálicas del grafito con las reglas cuánticas de niveles de energía y ondas electrónicas, los nanotubos de carbono surgen como conductores exóticos.

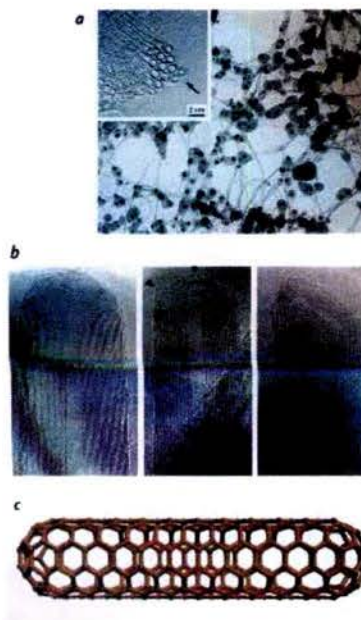


Figura 8. a) Nanotubos de carbono de una sola capa; b) Puntas de nanotubos de carbono concéntricos; c) Modelo de nanotubo cerrado con anillos pentagonales.

La poca masa de los electrones permite que se comporten como ondas y como partículas. Al igual que en cualquier otro fenómeno ondulatorio, las ondas electrónicas se amplifican o se cancelan entre sí. Por consiguiente, un electrón que se distribuya alrededor de la circunferencia de un nanotubo puede autocancelarse por completo; y quedarán sólo los electrones con idéntica longitud de onda correcta.

De todas las posibles longitudes de onda electrónicas, o estados cuánticos, que halla en una lámina plana de grafito, sólo un pequeño conjunto estará permitido cuando se enrolle para formar un nanotubo.

Los nanotubos de carbono no tienen todos el mismo intervalo de banda porque para cada circunferencia existe un conjunto exclusivo de estados permitidos de valencia y de conducción. Los nanotubos de menor diámetro cuentan con muy pocos estados muy separados en energía.

Al aumentar el diámetro de los nanotubos, se admiten cada vez más estados y la distancia entre ellos se acorta. Sucede, que nanotubos de diferente tamaño pueden tener intervalos de banda nulos (cero, igual que un metal), de la magnitud del intervalo de banda del silicio o de casi cualquier valor entre ambos extremos.

Ningún otro material conocido puede afinarse con semejante facilidad, aunque el crecimiento de los nanotubos produce todavía un montón de geometrías dispares. Por eso los investigadores se afanan en la búsqueda de mecanismos que nos garanticen tipos específicos de nanotubos.

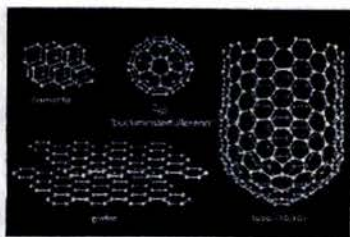


Figura 9. Comparación de las estructuras del *buckminsterfullereno* y de los nanotubos de carbono con el grafito y el diamante.

Por ser los enlaces entre átomos de carbono mucho más fuertes que los que hay entre los átomos metálicos, los nanotubos pueden transportar enormes cantidades de corriente eléctrica. Investigaciones recientes muestran que un manojo de nanotubos de un centímetro cuadrado de sección transversal podría conducir unos mil millones de amperes. Estas corrientes tan altas vaporizarían el cobre o el oro. Además, se predice que los nanotubos de carbono conducen el calor a la manera casi del diamante o el zafiro; idea que parece confirmada en experimentos provisionales. Los nanotubos podrían, pues, refrigerar eficientemente series muy densas de dispositivos.

En electrónica, la miniaturización ulterior de los hilos metálicos tiene que vencer dos enormes dificultades. En primer lugar, si se apretaran más los dispositivos, se provocaría un rápido sobrecalentamiento. En segundo lugar, al afilar los hilos metálicos la ráfaga de electrones que se movería a través de ellos tendría la suficiente fuerza para desplazar a los átomos metálicos y, en breve tiempo, los filamentos se degradarían, como fusibles fundidos. Por lo dicho anteriormente, los nanotubos de carbono podrían superar fácilmente ambos problemas.

Propiedades electrónicas y mecánicas de los nanotubos

Las primeras mediciones de conductividad eléctrica de nanotubos de carbono con varias capas fueron hechas utilizando microcontactos de oro conectados con técnicas litográficas. Estos estudios demostraron que la resistencia eléctrica dependía de la temperatura, en un intervalo de 2 a 300 K y que los nanotubos eran semimetálicos. Posteriormente, la conductividad de nanotubos alineados (de varias capas) mostró que los tubos se comportan como nanoconductores. Más recientemente, se demostró que la conductividad de los nanotubos de una sola capa depende de la helicidad y el diámetro. Dicho de otro modo, los nanotubos pueden ser tanto conductores como semiconductores.

Estos estudios también revelaron que los nanotubos individuales de una sola capa con diámetro de 0.14 nanómetros conducen la electricidad en forma discreta y, por lo tanto, son conductores cuánticos. Posteriormente se encontró que los nanotubos de una sola capa de 0.4 nanómetros de diámetro son superconductores eléctricos a temperatura del orden de 15 K, por lo tanto se han producido nanocircuitos utilizando nanotubos. También se han construido transistores que operan a temperatura ambiente utilizando un nanotubo de una sola capa.

Varios grupos de investigación, han construido con éxito dispositivos electrónicos operativos a partir de nanotubos de carbono. Ya existen transistores de efecto de campo (FET, por sus siglas en inglés) que utilizan nanotubos semiconductores sencillos entre dos electrodos metálicos para crear un canal por donde circulen los electrones. La corriente que fluye a través del mismo puede activarse o desactivarse aplicando voltajes a un tercer electrodo inmediato. Los dispositivos basados en nanotubos funcionan a temperatura ambiente con características eléctricas notablemente similares a los dispositivos comerciales de silicio. Se ha encontrado que el electrodo de la puerta puede cambiar la conductividad del canal de nanotubo en un FET en un factor de un millón o más, equiparable a los FET de silicio. *Investigación y Ciencia(Collins y Avouris, 2001)*

Debido a su minúsculo tamaño, el FET de nanotubos conmutaría sin error y consumiendo mucho menos energía que un dispositivo de silicio. En teoría, un conmutador fabricado a nanoescala podría trabajar a velocidades cronométricas de un terahertz o más, mil veces más deprisa que los procesadores disponibles. Ante el amplio abanico de intervalos de banda y conductividades propios de los nanotubos, son múltiples las posibilidades que se abren para nanodispositivos adicionales.

En el Centro de Investigación de IBM y en el Instituto de California en Berkeley, al medir uniones de nanotubos metálicos y semiconductores, se han observado que éstas se comportan como diodos, permitiendo que la electricidad circule en

una sola dirección. Las combinaciones de nanotubos con diferentes intervalos de banda podrían convertirse en diodos emisores de luz y quizás en láseres nanoscópicos. Nada parece ahora impedir la creación de un nanocircuito dotado de conexiones, conmutadores y elementos de memoria realizados con nanotubos y otras moléculas. Con esta ingeniería molecular podrían obtenerse, por fin, no sólo versiones minúsculas de dispositivos al uso sino también otros nuevos que exploten los efectos cuánticos.

En otro orden de ideas, es importante recalcar que la geometría (el acomodo de los átomos en el material) determina las propiedades tanto mecánicas como electrónicas de los nanotubos de carbono.

Observaciones realizadas por medio de microscopios electrónicos de alta resolución muestran que los nanotubos son excepcionalmente flexibles y no experimentan fracturas, es decir, pueden ser doblados mecánicamente por medio de un baño ultrasónico, pulverizándolos con trituradores o usando una resina polimérica. Los cálculos teóricos ya habían predicho estas propiedades. La extraordinaria flexibilidad de los nanotubos los hace excelentes candidatos para la fabricación de polímeros de alta resistencia.

En la siguiente tabla, se comparan algunas propiedades de los nanotubos de carbono con las de otros materiales convencionales. *Educación Química*(Garriz, 2001).

Tabla 1. Propiedades de los nanotubos de carbono en comparación con otros materiales.

PROPIEDAD	NANOTUBOS DE PARED UNICA	EN COMPARACIÓN
Tamaño	0,6 a 1,8 nanómetros de diámetro	La litografía por haz electrónico puede crear líneas de 50 nm de anchura y un espesor de unos poco nm
Densidad	1,33 a 1,40 gramos por centímetro cúbico	El aluminio tiene una densidad de 2,7 g/cm ³
Resistencia a la tracción	45 x 10 ⁹ pascal	Las aleaciones de acero de alta resistencia se rompen aproximadamente a 2 x 10 ⁹ Pascal
Elasticidad	Se pueden doblar hasta grandes ángulos y recuperarse sin sufrir daño	Los metales y las fibras de carbono se rompen en las fronteras de grano
Capacidad de transporte de corriente	Estimada en 10 ⁹ amperes por centímetro cuadrado	Los hilos de cobre se funden a un millón A/cm ² aproximadamente
Emisión de campo	Pueden activar fósforos a un voltaje de uno a tres volts si media una micra entre electrodos	Las puntas de molibdeno necesitan campos de 50 a 100V/um y tienen períodos de vida muy limitados
Transmisión de calor	Se predice que tienen un valor de 6,000 watts por metro por kelvin a temperatura ambiente	El diamante casi puro transmite 3320 W/m-k
Estabilidad térmica	Estables hasta 2800 grados centígrados en vacío, 750 grados centígrados de aire	Los filamentos metálicos en microchips se funden de 600 a 100 grados centígrados

Aplicaciones de los nanotubos de carbono

Algunas aplicaciones recientes de los nanotubos de carbono comprenden su uso como: a) materiales con capacidad de almacenamiento de gases como hidrógeno, argón o nitrógeno; b) sensores de gases tóxicos; c) fuentes de emisión de campo para el desarrollo de pantallas ultradelgadas de televisión y puntas para microscopio de efecto túnel; y d) contenedores de nanopartículas metálicas ferromagnéticas en procesos de almacenamiento de datos o tintas magnéticas en xerografía. *Ciencia(Terrones, 2003)*.

- a) Almacenamiento de gases: La fabricación de celdas de energía que utilizan hidrógeno podría revolucionar la industria de la transportación, ya que la combustión de hidrógeno únicamente libera agua como residuo. Sin embargo, el principal problema para la creación de automóviles ecológicos, utilizando hidrógeno como combustible, es el almacenamiento de este gas en celdas de pesos livianos que sean capaces de absorber grandes cantidades de gas. Debido a que los manojos de nanotubos de una sola capa cuentan con cavidades internas e intertubulares, es posible el almacenamiento de hidrógeno. También es factible el almacenamiento de hidrógeno en nanotubos producidos por pirólisis, los cuales presentan defectos. También se ha demostrado muy recientemente que es posible almacenar otros gases como nitrógeno, argón y helio en el conducto interno de los tubos multicapa. Estos resultados proporcionan esperanzas para el almacenamiento de gases e hidrocarburos como el metano. Los nanotubos se consideran como los cilindros más pequeños que puedan construirse.
- b) Sensores de gases tóxicos: En el año 2000, se demostró que la conductividad de pastillas fabricadas con nanotubos de una sola capa varía dependiendo de la atmósfera gaseosa en la que se encuentren los tubos. Por ejemplo, si los tubos son expuestos repentinamente a una atmósfera que contiene únicamente 1% de amoníaco, la conductividad de los tubos disminuye casi instantáneamente. Asimismo si los nanotubos son expuestos a 200 ppm de óxido nítrico, la conductividad de las muestras aumentan rápidamente. Estos resultados demuestran el gran potencial que tienen los nanotubos en el área de sensores de gases peligrosos. Se están llevando a cabo nuevas investigaciones en este rubro.
- c) Fuente de emisión de campo: En 1995, Walter de Heer y colaboradores demostraron que los nanotubos de carbono de varias capas de carbono se comportan como emisores de campo que operan con altas intensidades de corriente y a bajos voltajes. Estos resultados implican que es posible generar pantallas de televisión de ultra alta definición, ya que cada pixel estaría formado por uno o varios nanotubos.
- d) Otra ventaja de estos materiales es que también es posible producir lámparas de alta luminosidad y poco calentamiento, con voltajes muy reducidos. En los últimos tres años, los nanotubos de una sola capa también han mostrado propiedades extraordinarias de emisión de electrones, y la compañía Samsung en Corea ha fabricado pantallas de televisión con emisores que contienen nanotubos de una sola capa. Esta compañía espera que en los próximos cinco

años estén en el mercado pantallas de televisión o monitores de alta definición que contenga nanotubos.

- e) Almacenamiento de datos: También es posible llenar los nanotubos con metales y otros materiales. Durante las pasadas décadas, la generación de nanoalambres de hierro ha sido imposible debido a que este metal se oxida muy fácilmente, generando una capa de óxidos de hierro. Por esta razón, la idea de encapsular nanoalambres sensibles al aire dentro de nanotubos de carbono es altamente variable y potencialmente eficaz. De esta manera es posible, evitar que se formen capas de óxidos que provoquen anomalías en el campo magnético sobre la superficie de los nonomateriales. Recientemente se han producido satisfactoriamente películas de menos de 2 milímetros cuadrados y menos de 40 milímetros de espesor de nanotubos alineados llenos de hierro. Los tubos de hierro están constituidos por nanocristales y tienen dimensiones que varía desde 5 a 40 nanómetros de diámetro externo y menos de 10 micrómetros de longitud, mientras que los tubos de carbono que los envuelven presentan diámetros externos de aproximadamente 20 a 70 nanómetros y menos de 40 milímetros de largo.

Este tipo de materiales tiene aplicaciones en el área de almacenamiento magnético de información, en el cada nanoalambre podría ser magnetizado en dos posibles direcciones y constituiría un bit de información por cada nanoestructura.

Esto incrementaría la densidad de almacenamiento de información. Asimismo, estos materiales también son útiles en el desarrollo de nuevos productos en la industria de la xerografía y pigmentos (toners) magnéticos.

Muy recientemente se ha producido nanoalambres de aleaciones metálicas. Como ejemplo tenemos el INVVAR, una aleación de hierro y níquel que tiene un coeficiente de expansión térmico casi nulo. Estos resultados muestran que en principio es posible generar cualquier tipo de aleación a escalas nanométricas; sin embargo, sus propiedades serán diferentes a las fases en bulto (macrométricas).

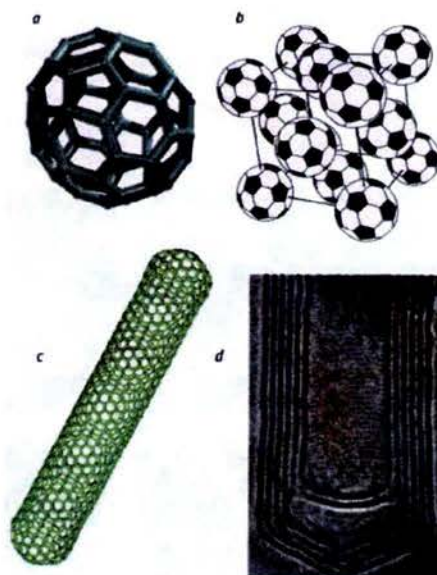


Figura 10. a) Modelo del *buckminsterfullereno* (C₆₀); b) cristal de C₆₀; c) modelo molecular de un nanotubo de carbono (un *fullereno* alargado); d) micrografía de transmisión de alta resolución de un nanotubo de carbono de 6 capas.

– De otros tipos

La presencia de defectos como anillos pentagonales o heptagonales de carbono en las estructuras gráficas cambian sus propiedades electrónicas. Al respecto, hemos propuesto capas cristalinas gráficas formadas por anillos de carbono con 5, 6 y 7 átomos a las que hemos llamado haeckelitas, en honor al biólogo Ernest Haeckel, quien dibujara radiolarios con motivos de pentágonos, hexágonos y heptágonos (Terrones y colaboradores, 2000)

En las haeckelitas debe haber el mismo número de anillos pentagonales y heptagonales, con la finalidad de compensar la curvatura positiva que producen los pentágonos y la negativa de los heptágonos. A diferencia de las hojas gráficas, que son semimetálicas, las haeckelitas son todas metálicas, por lo que si las enrollamos para formar nanotubos, éstos también serán metálicos, sin importar el tipo de arreglo estructural.

Al igual que los nanotubos de carbono, las haeckelitas son altamente rígidas (50 a 100 veces más resistentes que el acero).

Una propiedad interesante de estos arreglos con defectos es que presentan paredes rugosas muy similares a las que se observan en nanotubos de carbono irradiados con el haz de electrones de un microscopio electrónico.

Nanotubos de nitruro de boro

El nitruro de boro es muy similar al grafito: forma capas hexagonales en las que los átomos de boro y nitrógeno se alternan. Cada átomo de nitrógeno está unido a tres átomos de boro, y viceversa. Usando experimentos de arco eléctrico y pirólisis, ha sido posible formar fullerenos y nanotubos de nitruro de boro. *Ciencia(Terrones y colaboradores, 2003).*

Desde el punto de vista electrónico, los nanotubos de boro son semiconductores. Ya que el boro, el carbono y el nitrógeno pueden formar enlaces covalentes, se han podido introducir en nanotubos de carbono algunos átomos de boro y nitrógeno, incrementando así la conductividad de los tubos.

Nanotubos de disulfuros

El grafito y el nitruro de boro no son los únicos materiales en capas: existen muchos más, como los disulfuros de molibdeno y tungsteno. Aunque éstos tienen una estructura atómica más complicada, se ha podido introducir curvatura para formar partículas cerradas y nanotubos.

Los cálculos de propiedades electrónicas indican que todos los nanotubos de disulfuro de tungsteno y molibdeno son semiconductores; sin embargo, si el diámetro disminuye también lo hace la brecha semiconductor. Lo anterior nos pone en posibilidad de generar semiconductores específicos a la medida de nuestras necesidades.

Resultados teóricos recientes indican que los nanotubos de disulfuro de niobio son todos conductores. El tema de los disulfuros no está agotado, y es importante seguir trabajando en otros compuestos similares para poder introducir curvatura y así diseñar nuevos materiales. De la misma forma han podido obtenerse nanotubos de disulfuro de renio.

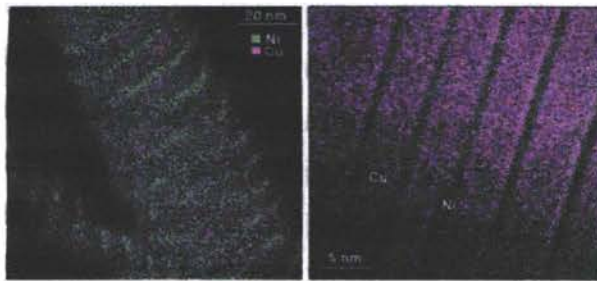


Figura 11. Nanoalambres de níquel y cobre.

III. PROCESOS DE FABRICACIÓN DE NANOMATERIALES

a. Técnicas más comunes de fabricación de nanomateriales

La búsqueda de una creciente miniaturización ha transformado el mundo. El desarrollo de la microelectrónica primero el transistor y después la agrupación de transistores para crear microprocesadores, chips de memoria y controladores-

ha hecho aparecer una amplia variedad de máquinas que manipulan información dirigiendo corrientes de electrones a través de silicio. La microelectrónica se basa en técnicas rutinarias que fabrican estructuras de muy poco más de 100 nanómetros de ancho. El diámetro de un hilo de 100 nanómetros cubriría cerca de 500 átomos de silicio.

La idea de construir nanoestructuras que comprendan sólo uno o algunos átomos es muy atractiva, como reto científico a la vez que como solución práctica. Una estructura del tamaño de un átomo constituye un límite fundamental: para hacer algo más pequeño habría que manipular los núcleos atómicos: en esencia, transmutar un elemento químico en otro. En los últimos años, se han aprendido diversas técnicas para la construcción de nanoestructuras, pero apenas se han comenzado a investigar sus propiedades y posibles aplicaciones.

Es perfectamente posible desarrollar nanoestructuras que actúen como componentes electrónicos, pero las aplicaciones principales tal vez difieran bastante: por ejemplo, el uso de partículas nanométricas como minúsculos sensores para investigar células en biología. Pero como los científicos no saben los tipos de nanoestructuras que finalmente desean construir, aún no han determinado los mejores procedimientos para elaborarla.

La revolución actual en el dominio nanométrico se inició en 1981, con la invención del microscopio de barrido por efecto túnel (STM), por el que ganaron el premio Nobel de física en 1986 Heinrich Rohrer y Gerd Binnig, del Laboratorio IMB en Auriach. Con tan sutil ingenio se detectan las minúsculas corrientes que se establecen entre la punta del microscopio y la muestra observada, permitiendo “ver” sustancias a escala de átomos individuales. El éxito del STM condujo a desarrollar otras sondas de exploración, entre ellas el microscopio de fuerza atómica (AFM). El principio de funcionamiento del AFM es similar al de un viejo fonógrafo. Una diminuta sonda –una fibra o una punta en forma de pirámide de dos a 30 nanómetros de anchura – se pone en contacto directo con la muestra. La sonda está fijada al extremo de un brazo, que flexiona al desplazarse la punta por la superficie de la muestra. Para medir la reflexión, se refleja un haz de luz láser en la cara superior del brazo. El AFM es capaz de detectar variaciones menores que las dimensiones de la sonda en la topografía vertical de una superficie. *Investigación y Ciencia*(Whitesides, Love, 2001).

Pero las sondas de barrido sirven para mucho más que para la simple observación del mundo atómico: también valen para crear nanoestructuras. La punta del AFM mueve nanopartículas a través de superficies y las ordena según esquemas. También puede utilizarse para hacer incisiones en una superficie (o más corrientemente en las películas monocapa de átomos o moléculas que recubren esa superficie). De modo similar, se aumentan las corrientes que salen de la punta AFM, el microscopio se convierte en un minúsculo generador de haz electrónico, apto para grabar esquemas a escala nanométrica. Además, esa punta puede desplazar los átomos uno a uno sobre una superficie de suerte que formen anillos de hilos de un solo átomo de anchura.

- Fotolitografía

La fotolitografía, técnica utilizada para fabricar chips de ordenadores y los demás sistemas microelectrónicos, requiere estructuras por debajo de 100 nanómetros. Conseguirlo resulta, sin embargo, difícil y caro.

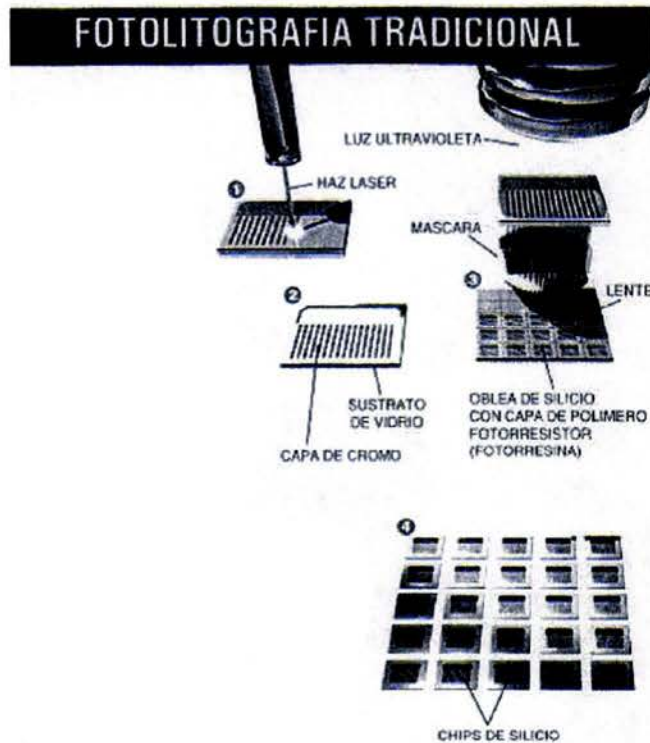
Consideremos primero las ventajas y desventajas de la fotolitografía. Mediante esta técnica tan productiva salen de fábrica tres mil millones de transistores por segundo, sólo en los EE.UU. En esencia, no es sino una extensión de la fotografía. Primero se obtiene el equivalente a un negativo fotográfico que contiene el esquema requerido para una parte de los circuitos del microchip. Este negativo, llamado máscara o patrón, se utiliza después para copiar el esquema en los metales y semiconductores de un microchip. Como sucede con la fotografía, el negativo tal vez sea difícil de obtener, pero es fácil multiplicar las copias porque la máscara puede utilizarse muchas veces. El proceso, pues, se divide en dos etapas: la preparación de la máscara (un solo evento, quizá lento y costoso) y el uso de la máscara para fabricar réplicas (rápido y económico).

Para elaborar la máscara de parte de un chip, el fabricante diseña primero el esquema de los circuitos a una escala suficientemente grande, que luego convierte a un esquema en película metálica opaca (cromo), aplicado sobre una placa transparente (vidrio o sílice). A continuación, la fotolitografía reduce el tamaño del esquema siguiendo un proceso análogo al de los laboratorios fotográficos. Se hace pasar por la máscara de cromo un haz luminoso (luz ultravioleta de una lámpara de arco de mercurio), que atraviesa después de una lente para formar una imagen sobre un revestimiento fotosensible de polímero orgánico (llamado fotorresistor) en la superficie de una oblea de silicio.

¿Por qué no emplear la fotolitografía para fabricar nanoestructuras? Esta técnica tropieza con un obstáculo: que la mínima longitud de onda de luz ultravioleta que se emplea en los procesos de producción ronda los 250 nanómetros. Intentar construir estructuras mucho menores que la mitad de esa distancia viene a ser como pretender leer un texto de letra demasiado menuda; los trazos se desdibujan y confunden a causa de la difracción.

Las menores estructuras obtenidas en la producción industrial son algo mayores que 100 nanómetros, y se han conseguido estructuras microelectrónicas. Pero tales estructuras no son lo suficientemente diminutas como para explorar algunos de los más interesantes aspectos de la disciplina.

La segunda limitación es consecuencia de la primera: la dificultad técnica de fabricar estructuras tan pequeñas por medio de la luz determina también su enorme costo. Los instrumentos fotolitográficos necesarios para fabricar chips con dimensiones inferiores a 100 nanómetros costarán cientos de millones de dólares por unidad. Los fabricantes podrán aceptar o no este gasto, que resultará, en todo caso, prohibido para los biólogos, químicos, físicos de materiales y otros que deseen explorar la nanotécnica con estructuras de su propio diseño.



1. Un haz láser graba el esquema del microcircuito en una película de polímero fotosensible depositada sobre una capa de cromo y un sustrato de vidrio. Las zonas del polímero expuestas al haz pueden eliminarse selectivamente.
2. Las partes expuestas del cromo se eliminan también, y el resto del polímero se disuelve. Se obtiene así una máscara, equivalente a un negativo fotográfico.
3. Cuando se dirige a la máscara un haz de luz ultravioleta, la luz atraviesa los huecos dejados en el cromo. El esquema se achica por medio de una lente que enfoca la luz sobre la capa de fotorresina que recubre una oblea de silicio.
4. Las partes expuestas de la fotorresina se eliminan, lo que permite la reproducción del esquema en miniatura sobre los chips de silicio

Figura 12. Etapas de la técnica de fotolitografía

- Litografía

Otra posible solución es la litografía por rayos X, con longitudes de onda entre 0.1 y 10 nanómetros, o por luz en el ultravioleta extremo, con longitudes de onda de 10 a 70 nanómetros. Dado que estas radiaciones son de longitud de onda muy inferior a la de la luz ultravioleta utilizada hoy en fotolitografía, estas técnicas se enfrentan a una serie de problemas propios: las lentes habituales no son transparentes a la luz ultravioleta extrema, y no enfocan los rayos X. Por si fuera poco, la radiación energética deteriora rápidamente muchos los materiales empleados en máscaras y lentes. Pero es obvio que la industria microelectrónica prefiera fabricar los nuevos chips siguiendo técnicas familiares perfeccionadas, y en esa dirección se trabaja con afán. Algunas de las técnicas investigadas (la litografía ultravioleta avanzada, por ejemplo) terminarán por llegar al mercado. Sin embargo, no conseguirán abaratar las nanoestructuras, ni servirán, en consecuencia, para ensanchar el acceso a la nanotécnica de ingenieros y científicos.

La necesidad de encontrar métodos sencillos y económicos para fabricar nanoestructuras ha estimulado la búsqueda de caminos no explorados. Nuestro interés por el tema data de los años noventa, cuando nos dedicábamos a construir estructuras elementales que se requieren en los sistemas microfluidicos, es decir, chips con canales y cámaras capaces de contener líquidos. Los canales en este tipo de chips son enormes en términos de microelectrónica: 50 micrómetros (50.000 nanómetros típicos, pero su producción admite técnicas muy versátiles. La fabricación de chips microfluidicos puede ser rápida y económica, pues se emplean polímeros y geles orgánicos, materiales ajenos al mundo de la electrónica. Descubrimos entonces que podíamos aplicar técnicas similares para construir nanoestructuras.

Los métodos ensayados representan un retroceso en la técnica. En vez de servirnos de agentes físicos –luz y electrones– utilizábamos procesos mecánicos corrientes: impresión, estampado, moldeado y grabado en relieve. Estas técnicas se denominan “litografía blanda” por manejar como herramienta común un bloque de polidimetilsiloxano (PDMS), el polímero gomoso que sirve para tapar grietas en las bañeras. (los físicos suelen llamar “materias blandas” a estos compuestos orgánicos).

Para realizar una reproducción mediante litografía blanda, se empieza construyendo un molde o matriz. Se recurre a la fotolitografía o litografía de haz electrónico para crear un esquema en la capa de polímero fotorresistor depositada en la superficie de una oblea de silicio. Se genera así un patrón en bajorrelieve en el que emergen del silicio islas de esa fotorresina. Seguidamente se vierte sobre el patrón un precursor químico del PDMS – un líquido de plena fluidez-, que se endurece para formar el sólido gomoso. Lo que se obtiene es una matriz en PDMS, que copia con asombrosa fidelidad el esquema original, llegando a reproducir detalles de unos pocos nanómetros.

Aunque sea caro crear un patrón en bajorrelieve de fina resolución por exigir litografía de haz electrónico u otras técnicas avanzadas, su copia en matrices PDMS resulta fácil y económica. Y una vez obtenida la matriz, es posible

utilizarla para construir nanoestructuras por diversos procedimientos poco costosos.

El primer método –idea de Amit Kumar, - se denomina impresión por microcontacto. La matriz PDMS se “entinta” con una solución reactiva compuesta de tioles, sustancias orgánicas. Después, se pone la matriz en contacto con una lámina adecuada de “papel”, esto es, una fina película de oro depositada sobre una placa de vidrio, silicio o polímero. Los tioles reaccionan con la capa de oro y forman una película sumamente estructurada, la monocapa autoensamblada, o SAM, donde se produce el esquema de la matriz. Dado que la tintura de tilo se extiende un poco al tocar la superficie, la monocapa no alcanza la resolución de la matriz PDMS. Pero, aplicada correctamente, la impresión por microcontacto puede producir patrones con dimensiones de tan sólo 50 nanómetros.

Otro método de litografía blanda, llamado micromoldeo capilar, requiere utilizar la matriz PDMS para moldear los esquemas. Al colocar la matriz sobre una superficie dura, asciende por capilaridad un polímero líquido hacia las cavidades situadas entre la matriz y la superficie. El polímero se solidifica luego según el esquema deseado. Con esta técnica pueden replicarse estructuras menores de 10 nanómetros. Resulta idónea para producir dispositivos ópticos en sublongitudes de onda, guía-ondas y polarizadores ópticos, todos ellos susceptibles de aplicación en redes de fibra óptica y quizás en computadores ópticos. También pueden hallar sitio en el campo de la nanofluidica, ampliación de la microfluidica en la que se producirían para investigaciones bioquímicas con canales de sólo algunos nanómetros de anchura. A esa escala, la dinámica de fluidos podría descubrir nuevos procedimientos para separar fragmentos de ADN, entre otros materiales.

Estos métodos no requieren equipos especializados. De hecho pueden desarrollarse de modo manual en un laboratorio ordinario. La fotolitografía tradicional exige una instalación en sala blanca, exenta de polvo y suciedad; una partícula de polvo posada sobre la máscara produciría una mancha intolerable en el esquema y podrá originar el fallo del dispositivo fabricado (y a veces de los que le rodean). La litografía blanda suele ser más tolerante por la elasticidad de la matriz PDMS. Si queda atrapada una mota de polvo entre la matriz y la superficie, la matriz presionará sobre la parte superior de la partícula, pero mantendrá contacto con el resto de la superficie. Entonces se producirá correctamente el patrón excepto en el lugar donde quedó atrapado el contaminante.

Además, la litografía blanda permite obtener nanoestructuras en una extensa gama de materiales, incluidas las complejas para moléculas orgánicas necesarias para estudios biológicos. Es posible imprimir o moldear esquemas lo mismo sobre superficies curvas que sobre superficies planas. Pero la técnica no es la más indicada para realizar las estructuras que requieren la nanoelectrónica compleja. Actualmente todos los circuitos integrados se componen de capas apiladas de diferentes materiales.

Las deformaciones y distorsiones de la matriz blanda PDMS generan pequeños errores en el esquema replicado y desajuste entre ese esquema y cualesquiera esquemas subyacentes fabricados previamente. Por pequeñas que sean las distorsiones o desajustes, se bastan para estropear un dispositivo multicapa nanoelectrónico. De ahí que la litografía blanda no sea muy adecuada para la

fabricación de estructuras con múltiples capas de han de apilarse unas sobre otras con precisión absoluta.

Se han encontrado, maneras de corregir al menos en parte- este inconveniente, utilizando una matriz rígida en lugar de una elástica. En cierta técnica litográfica de fotoimpresión automática por iluminación ultravioleta, desarrollada por Gran Willson, de la Universidad de Texas se recurre a la fotolitografía para grabar un esquema en una placa de cuarzo, obteniendo así un patrón rígido en bajorrelieve.

Debemos a Stephen Chou, de la Universidad de Princeton, una técnica afin, llamada litografía por nanoimpresión, en la que también se emplea un patrón rígido, pero la película de polímero utilizada se calienta a una temperatura cercana al punto de fusión para facilitar el proceso de grabado en relieve. Por ambos métodos pueden obtenerse estructuras bidimensionales con fidelidad satisfactoria; falta ver si las técnicas resultan adecuadas para la fabricación de dispositivos electrónicos.

LITOGRAFIA BLANDA

La impresión, el moldeo y otros procesos mecánicos realizados mediante una matriz elástica pueden conseguir esquemas de características nanométricas. Las técnicas permiten fabricar dispositivos para comunicaciones ópticas o investigación bioquímica.

PRODUCCION DE LA MATRIZ ELASTICA



1. Se vierte un precursor líquido de polidimetilsiloxano (PDMS) sobre un patrón bajorrelieve producido por fotolitografía o litografía de haz electrónico.

2. El líquido se endurece y forma un sólido gomoso que se ajusta al esquema original.

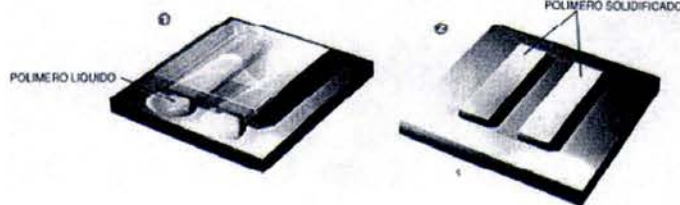
3. La matriz PDMS se desprende del patrón.

IMPRESION POR MICROCONTACTO



1. La matriz PDMS se entinta con una solución compuesta de tioles, moléculas orgánicas; después se comprime contra una fina capa de oro depositada sobre una placa de silicio.
2. Los tioles forman una monocapa autoensamblada sobre la superficie de oro en la que se reproduce el esquema de la matriz, con dimensiones de 50 nm.

MICROMOLDEO CAPILAR



1. La matriz de PDMS se coloca sobre una superficie dura; un polímero líquido asciende hacia las cavidades existentes entre la superficie y la matriz.
2. El polímero se solidifica según el esquema deseado, que puede contener dimensiones menores de 10 nm.

Figura 13. Etapas de la técnica de litografía blanda.

Un curioso método nuevo de fabricación por sonda de barrido es la litografía de pluma bañada, desarrollada por Chad Mirking, de la Universidad del Noroeste. Esta técnica recuerda la escritura con pluma de ganso. La punta del AFM se recubre con una delgada película de moléculas del tilo, que, aunque insolubles en agua, reaccionan con una superficie de oro (el mismo proceso químico de la impresión por microcontacto). Cuando el instrumento se coloca en una atmósfera donde existe una elevada concentración de vapor de agua, se condensa una diminuta gota de agua entre la superficie de oro y la punta del microscopio. La

tensión superficial mantiene la punta a una distancia fija del oro, distancia que no varía al moverse la punta a través de la superficie. La gota de agua actúa a manera de puente por donde las moléculas de tilo emigran de la punta a la superficie del oro y se quedan allí fijas. Se ha aplicado este procedimiento para grabar líneas de muy pocos nanómetros.

Aunque la litografía de pluma bañada sea un tanto lenta, puede utilizar como "tinta" muchos tipos diferentes de moléculas. Aportan así una gran flexibilidad química a la grabación en escala nanométrica. Todavía no se ha determinado cuáles serían las aplicaciones óptimas de esta técnica, pero una de ellas podría consistir en ejecutar modificaciones precisas de diseños de circuitos. Mirkin acaba de demostrar que esta clase de litografía permite grabar directamente sobre el silicio utilizando una variante de la tinta.

- De arriba abajo y de abajo arriba

Todas las formas de litografía examinadas hasta ahora se consideran métodos descendentes (de arriba abajo), es decir, se empieza por un esquema generado a escala mayor y sus dimensiones laterales se reducen (a menudo por un factor de 10) antes de grabar las nanoestructuras. Es preciso trabajar así para la fabricación de dispositivos electrónicos como los microchips, cuyas funciones dependen más de los esquemas que de las dimensiones. Pero ningún método descendente es la panacea; ninguno puede conseguir nanoestructuras de cualquier material con comodidad, rapidez y a bajo costo. Por ello los investigadores se interesan cada vez más por los procesos ascendentes (de abajo arriba), que parten de los átomos a moléculas y llegan a construir nanoestructuras. Estos métodos pueden obtener fácilmente las nanoestructuras más pequeñas -de dimensiones entre 2 y 10 nanómetros- de una manera económica. Pero tales estructuras suelen generarse como partículas simples en suspensión o depositadas en superficies, más que como esquemas de diseño interconectados.

Dos de los principales métodos ascendentes se aplican a la obtención de nanotubos y puntos cuánticos. Los primeros son largos tubos cilíndricos de carbono construidos por un proceso de crecimiento catalítico en que se vierte, a escala nanométrica, metal fundido (generalmente hierro) como catalizador. El grupo de investigación más activo en puntos cuánticos fue el de Louis Brus (en los laboratorios Bell), continuando su desarrollo Paul Alivisatos, de la Universidad de California en Berkeley y Mounji Bawendi, del Instituto de Tecnología de Massachussets, entre otros.

Los puntos cuánticos son cristales que contienen unos pocos cientos de átomos nada más. Como los electrones de un punto cuántico están confinados en niveles de energía muy separados, el punto emite sólo una longitud de onda al ser excitado. Esta propiedad permite que el punto cuántico pueda ser utilizado como un marcador biológico.

Un procedimiento utilizado para obtener puntos cuánticos implica una reacción química entre un ion metálico (cadmio, por ejemplo) y una molécula que sea capaz de donar un ion de selenio. Esta reacción genera cristales de seleniuro de cadmio. El truco consiste en impedir que los cristales se adhieran entre sí a la par que crecen hasta el tamaño deseado. Para aislar unas de otras las partículas en crecimiento, la reacción se realiza en presencia de moléculas orgánicas que actúan

como surfactantes, revistiendo la superficie de cada partícula de seleniuro de cadmio a medida que crece. Estas moléculas orgánicas evitan el amontonamiento de los cristales y regulan su velocidad de crecimiento. La geometría de las partículas puede controlarse hasta cierto punto mezclando moléculas orgánicas en diferentes proporciones. La reacción puede generar partículas de formas diversas, como esferas, varillas y tetrápodos (partículas de cuatro brazos).

Importa sintetizar puntos cuánticos de dimensiones y composición uniformes, puesto que el tamaño del punto determina sus propiedades electrónicas, magnéticas y ópticas. Se puede seleccionar el tamaño de las partículas variando el tiempo que dura la reacción. El revestimiento orgánico ayuda también a fijar el tamaño. Cuando la nanopartícula es minúscula (en la escala de las moléculas), el revestimiento orgánico se halla holgado y puede crecer más. Al aumentar la partícula, las moléculas orgánicas se aglomeran. Existe un tamaño de partículas óptimo que permite el empaquetado más estable de las moléculas orgánicas y proporciona, por tanto, la máxima estabilización para las superficies de los cristales. *Investigación y Ciencia*(*Alivisatos, 2001*)

Las nanopartículas de seleniuro de cadmio prometen conseguir algunos de los primeros productos comerciales. Quantum Dot Corporation ha venido desarrollando estos cristales para utilizarlos como etiquetas biológicas. Los investigadores pueden fijar puntos cuánticos para marcar proteínas y ácidos nucleicos. Así, al iluminar una muestra con luz ultravioleta, los cristales se tomarán fluorescentes para una determinada longitud de onda y revelarán dónde se ubican las proteínas etiquetadas. Numerosas moléculas orgánicas son también fluorescentes, pero los puntos cuánticos poseen varias ventajas más en ese ámbito. La primera es que el color y la fluorescencia pueden ajustarse a voluntad con sólo cambiar el tamaño de la partícula: cuanto mayor sea ésta, más se desplazará hacia el extremo rojo del espectro la luz emitida. La segunda, si todos los puntos son de igual tamaño, presentarán un espectro restringido de fluorescencia: emitirán, pues, un color muy puro. El interés de esta investigación radica en que posibilita el empleo de partículas de diverso tamaño para convertirlas en marcadores distintivos. La tercera, que la fluorescencia de los puntos cuánticos no se desvanece al exponerse a la luz de las moléculas orgánicas. Los puntos cuánticos utilizados como colorantes en la investigación biológica admiten períodos de observación de la duración que convenga.

Se explora también la posibilidad de construir estructuras a partir de coloides (nanopartículas en suspensión) Christopher Murria y un equipo del Centro de investigación Thomas J. Watson de IBM estudian la aplicación de coloides para la creación de un medio destinado al almacenamiento de datos de densidad ultraelevada. Los coloides del equipo IBM contienen nanopartículas magnéticas de tres nanómetros solamente, cada una de ellas compuestas de unos 1000 átomos de hierro y de platino. Cuando se extiende el coloide sobre una superficie y se deja evaporar el disolvente, las nanopartículas cristalizan en redes de dos o tres dimensiones. Los estudios iniciales indican que estas redes tendrían capacidad de almacenar del orden del billón de bits de datos por centímetros cuadrado, o sea, de 10 a 100 veces más que los actuales dispositivos de memoria.

b. Fabricación de nanotubos de carbono

Hay tres formas de fabricar nanotubos: volatilizar, hornear y bombardear

Aunque Sumio Iijima fue el primero en ver un nanotubo, otros se adelantaron en su fabricación. Sin saberlo, los hombres de Neandertal fabricarían cantidades minúsculas de nanotubos en las hogueras con que calentaban sus cuevas. Separados por el calor, los átomos de carbono se recombinan en el hollín; unos engendran glóbulos amorfos, otros unas esferas llamadas “buckybolas” y otros largas cápsulas cilíndricas, los “buckytubos” o nanotubos. La ciencia ha descubierto tres formas de fabricar hollín que contiene una proporción notable de nanotubos. Hasta ahora, sin embargo, los tres métodos sufren algunas limitaciones importantes: todos producen mezclas de nanotubos con una amplia gama de longitudes, muchos defectos y variedad de torsiones. *Investigación y Ciencia*(Collins y Avouris, 2001).

- Volatilización

En 1992, Thomas Ebbesen y Pullickel M. Ajayan del Laboratorio de Investigación fundamental de NEC en Tsukuba publicaron el primer método de fabricación de cantidades macroscópicas de nanotubos. Consiste en conectar dos barras de grafito a una fuente de alimentación, separarlas unos milímetros y accionar un interruptor. Al saltar una chispa de 100 amperes de intensidad entre las barras, el carbono se evapora en un plasma caliente. Parte del mismo se vuelve a condensar en forma de nanotubos.

Rendimiento normal: Hasta un 30 por ciento en peso.

Ventajas: Las altas temperaturas y los catalizadores metálicos añadidos a las barras pueden producir nanotubos de pared única y múltiple con pocos defectos estructurales, si alguno.

Limitaciones: Los tubos tienden a ser cortos (50 micras o menos) y depositarse en formas y tamaños aleatorios.

- Horneado

Morinubo Endo, de la Universidad de Shinshu en Nagano, introdujo, en la fabricación de nanotubos, el método de la deposición química en fase vapor (CVD). Se coloca un sustrato en un horno, se calienta a 600 grados centígrados y lentamente se añade metano, gas que contiene carbono. Al descomponerse el gas, libera átomos de carbono, que se pueden recombinar en forma de nanotubos.

Joe Liu y sus colegas de la Universidad de Duke han ideado un catalizador poroso que convierte casi todo el carbono en gas para la creación de nanotubos. Imprime diagramas de partículas de catalizador sobre el sustrato, Hongjie Dai y sus colegas de Stanford han controlado las posiciones de formación de los tubos y han venido trabajando para combinar este crecimiento controlado con la técnica estándar de silicio.

Rendimiento normal: de 20 a casi 100 por cien.

Ventajas: La técnica de CVD es el más sencillo de los tres métodos para su aplicación a escala industrial. Podría emplearse para fabricar nanotubos largos, necesarios en las fibras empleadas en materiales compuestos.

Limitaciones: Los nanotubos fabricados así, suelen ser de pared múltiple y a veces están plagados de defectos. De ahí que los tubos tengan sólo una décima de la resistencia a la tracción respecto a los fabricados por la descarga de arco.

– Bombardeo con láser

Se ocupaban Richard Smalley y su grupo, de la Universidad Rice, del bombardeo de un metal con pulsos intensos de láser para producir moléculas metálicas más extravagantes cuando les llegó la noticia del descubrimiento de los nanotubos. En sus dispositivos sustituyeron el metal por barras de grafito. No tardaron en producir nanotubos de carbono utilizando pulsos de láser en lugar de electricidad para generar el gas caliente de carbono a partir del que se forman los nanotubos.

Rendimiento normal: Hasta un 70 por ciento.

Ventajas: Producen nanotubos de pared única con una gama de diámetros que se puede controlar variando la temperatura de reacción.

Limitaciones: Este método necesita láseres muy caros.

Los nanotubos de carbono muestran un segundo comportamiento eléctrico de sumo interés para los ingenieros. En 1995, un grupo de la Universidad Rice observó que, cuando se colocaban erguidos y se cargaban eléctricamente, los nanotubos de carbono semejaban varillas o tubos de alumbrado, concentrando el campo eléctrico en sus puntas. Pero mientras una varilla de alumbrado conduce un arco a tierra, un nanotubo emite electrones desde su punta a una velocidad prodigiosa. Como son tan agudos, los nanotubos emiten electrones a voltajes menores que los electrodos fabricados con la mayoría de otros materiales, y sus vigorosos enlaces de carbono permiten que los nanotubos duren más sin ningún desperfecto.

Se había imaginado este compartimento, llamado emisión de campo, para aprovecharlo en una técnica que sustituyera a los televisores y a los monitores de ordenador, voluminosos y poco eficientes, con paneles planos de menor volumen y a mayor rendimiento, sin merma del brillo. La idea, sin embargo, ha tropezado siempre con la fragilidad de los emisores de campo disponibles. Se confía en que los nanotubos puedan salvar ese escollo y despejar el camino para una alternativa a los tubos de rayos catódicos o a los paneles de cristal líquido.

Resulta de una sencillez asombrosa fabricar, a partir de nanotubos, un emisor de campo de alta corriente. Basta con mezclarlos con plásticos en una pasta compuesta, se untan sobre un electrodo y se aplica un voltaje. Algunos nanotubos de la capa apuntarán, indefectiblemente, hacia el electrodo opuesto y emitirán electrones. En el instituto de Tecnología de Georgia, Stanford y otras instituciones se han encontrado ya métodos para el desarrollo de grupos de nanotubos erguidos en pequeñas rejillas ordenadas. Con una óptima densidad, estos grupos pueden emitir más de un amper por centímetro cuadrado, suficiente para iluminar los fósforos en una pantalla y son capaces de controlar dispositivos de microondas y conmutadores de alta frecuencia en estaciones de telefonía móvil.

Existen dos compañías empeñadas en la fabricación de bienes que utilizan nanotubos de carbono como emisores de campo. La japonesa Ise Electronics ha ensayado compuestos de nanotubos para fabricar prototipos de bombillas de tubos de vacío en seis colores cuyo brillo dobla el de las bombillas tradicionales, tienen una mayor duración y decuplican el ahorro energético. El primer prototipo ha funcionado bien durante más de 10,000 horas y aún no ha fallado. Los ingenieros de Samsung en Seúl esparcen nanotubos en una película delgada sobre la electrónica de control y luego colocan encima vidrio revestido de fósforo para fabricar un prototipo de pantalla plana. Cuando realizaron la demostración del panel, en 1999, eran optimistas respecto a que la compañía pudiese tener el dispositivo – que brillará como un tubo de rayos catódicos y consumirá una décima parte de potencia- listo para su producción en el año en curso.

El tercer ámbito en el que los nanotubos de carbono muestran propiedades electrónicas especiales es el de escala muy pequeña, allí donde revisten interés los efectos que dependen del tamaño. A ciertas escalas, nuestras ideas de filamentos con resistencia fracasan de forma estrepitosa y deben sustituirse por modelos de mecánica cuántica. Se trata de un reino, inalcanzable para la técnica de silicio, que puede ofrecer nuevos descubrimientos sorprendentes; exigirá también bastante mayor investigación que en el caso de los nanocircuitos a los dispositivos de emisión de campo con nanotubos.

Entre los temas debatidos a resolver citemos el concerniente al movimiento preciso de los electrones a lo largo de un nanotubo. Según parece, en los nanotubos sin defectos los electrones viajan “balísticamente”, sin ninguna dispersión, que es el agente causal de la resistencia de los filamentos metálicos. Cuando los electrones pueden viajar largas distancias sin dispersión, mantienen sus estados cuánticos, fenómeno clave para observar la interferencia entre ondas electrónicas. Además, la falta de dispersión ayudaría a entender por qué los nanotubos conservan su estado de espín electrónico cuando se desplazan (el espín electrónico es una propiedad cuántica). Apoyados en este insólito comportamiento algunos se proponen construir dispositivos “espíntrónicos” que se activen o desactiven en lugar de hacerlo en respuesta a su carga (lo que ocurre en los dispositivos electrónicos).

Asimismo, pueden controlarse con exquisita precisión el flujo de electrones en el tamaño mínimo de un nanotubo. Se acaba de demostrar en los nanotubos el bloqueo de Coulomb, fenómeno en virtud del cual los electrones repelen cualquier pretensión de insertar simultáneamente más de un electrón en dichas estructuras. El fenómeno podría facilitar la construcción de transistores de un solo electrón. Lo último en electrónica sensible. Pero las propias mediciones abren interrogantes que la física actual no sabe despejar. Confinados en estos finísimos filamentos unidimensionales, los electrones se comportan de forma tan extraña que apenas si parecen tales partículas.

Con el tiempo, pues, los nanotubos podrían ofrecer no sólo versiones menores y mejores que de los dispositivos existentes, sino también algunos de nuevo cuño que dependerían por entero de los efectos cuánticos. Queda mucho, cierto, por conocer a propósito de dichas propiedades de los nanotubos antes de poder sacarles partido. Sobre la mesa yacen ya algunas cuestiones. Sabemos que todos los dispositivos moleculares, incluidos los nanotubos son muy sensibles al ruido

producido por fluctuaciones eléctricas, térmicas y químicas. Se ha comprobado que, cuando se fija un contaminante (oxígeno, por ejemplo) a un nanotubo, se resienten sus propiedades eléctricas. Eso, que puede ser útil para crear detectores químicos delicadamente sensibles, constituye un obstáculo para la fabricación de circuitos de una sola molécula.

Pese a todo, con tantas vías de desarrollo en marcha, parece claro que ya no se trata de saber si los nanotubos se convertirán en componentes útiles de los ingenieros electrónicos del futuro, sino simplemente cómo y cuándo.

IV. APLICACIONES

a. En la medicina

En los últimos 35 años se han dado grandes pasos hacia la construcción de dispositivos complejos de dimensiones cada vez menores, hasta tal punto que algunos creen que son posibles intervenciones médicas de ese tipo y que pronto estarán navegando robots minúsculos por las venas. *Investigación y Ciencia*(Alivisatos, 2001).

La Iniciativa Nanotécnica Nacional incluye entre sus objetivos, o “grandes retos”, una serie de mejoras previsibles de la detección, diagnóstico y tratamiento de las enfermedades. Entre los objetivos, se proponen nuevas ayudas para la visión y el oído, pruebas rápidas para la detección de la propensión a enfermedades y de la reacción a fármacos, y dispositivos minúsculos capaces de descubrir riesgos en el cuerpo, como tumores incipientes, infecciones o problemas cardíacos, y transmitir la información a un receptor externo, cuando no arreglarlos sobre la marcha.

La Nanotecnología ofrece un plan interesante para la medicina, basado en tres objetivos principales:

1.- Mejorar los métodos de formación de imágenes.

Por medios de contraste de nuevo cuño detectarían los problemas en fases más tempranas y tratables. Podrían, por ejemplo, descubrir tumores en su estado precoz de pocas células y evitar consecuencias fatales.

2.- Establecer nuevas formas de tratar las enfermedades.

A través de la administración de nanopartículas en sitios indicados, incluidos los que resultan de difícil acceso para los fármacos conocidos. Así, por ejemplo, unas nanocascarillas de oro (esferas) dirigidas contra un tumor podrían, sometidas a luz infrarroja, calentarse lo bastante como para destruir las neoformaciones.

3.- Mejorar los implantes superiores.

Las modificaciones nanométricas de los implantes superficiales mejorarían la duración del implante y su biocompatibilidad; como botón de muestra, una cadera

artificial recubierta con nanopartículas podría conectarse al hueso circundante más firmemente de lo normal, con lo que se evitaría su desprendimiento.

b. En la investigación biomédica

La nanotecnología podría proporcionar nuevos instrumentos a la investigación biomédica; por ejemplo, ofrecer tipos nuevos de etiquetas útiles para los experimentos en torno a nuevos fármacos o para conocer qué conjuntos de genes operan en determinadas circunstancias. Los dispositivos nanométricos podrían utilizarse en las pruebas diagnósticas y genéticas, amén de convertirse en óptimos medios de contraste en las técnicas no agresivas de formación de imágenes o en vectores de administración de fármacos.

La mayoría de las nanotécnicas que están desarrollándose con fines biomédicos (**microfluidos e investigación biomédica**) toman la forma de objetos diminutos inmersos en cantidades grandes de fluido, sea agua, sangre o un complejo brebaje experimental. Pero los investigadores pueden construir también dispositivos que manejan cantidades minúsculas de esos líquidos. Tales sistemas microfluidos, así se les llama, bombean soluciones a través de canales estrechos y controlan el flujo con válvulas pequeñísimas y campos eléctricos intensos.

Gracias a esta capacidad de manejar cantidades infinitesimales de solución se pueden hacer muchos experimentos diferentes con una muestra escasa; además pueden realizarse de un modo muy eficaz, con cientos de pruebas desarrolladas en un solo portador de vidrio. Los dispositivos microfluidos ofrecen los medios para efectuar experimentos que no podrían acometerse de otra forma; por ejemplo, aplicar soluciones de prueba con composiciones específicas a partes diferentes de una célula.

Aunque muchos de los componentes que se están creando para estos sistemas superan de lejos la micra, en algunos dispositivos experimentales hay dimensiones nanométricas. Destacan los métodos que el equipo de Harold G. Craighead, de la Universidad de Cornell, ha ideado para clasificar fragmentos de ADN en agua por su tamaño según lo que tardan en atravesar cien nanómetros. Estos u otros dispositivos con nanofluidos podrían en principio aumentar la velocidad y reducir el costo de la separación de las moléculas de ADN para su secuenciación. En teoría, cabría adaptarlos a la separación de proteínas o de otras moléculas.

La propia biología constituye una suerte de virtuosismo nanotécnico. Hasta el organismo más complejo está compuesto por células muy pequeñas, integrado a su vez por piezas nanométricas: proteínas, lípidos, ácidos nucleicos y otras moléculas. Ya se venden como agentes de contraste ciertas estructuras inorgánicas nanométricas. Se trata de unos cristales minúsculos.

La naturaleza viva ofrece un hermoso ejemplo de la utilidad de esos cristales inorgánicos. Me refiero a las bacterias magnetotácticas (**sensibles al magnetismo**). El conjunto de los cristallitos forma una brújula en miniatura. Puesto que en la mayoría de los sitios el campo magnético terrestre está inclinado, la bacteria magnetotáctica podrá seguir una línea de campo magnético hacia abajo en su movimiento hacia el destino deseado.

Esa brújula es una maravilla de ingeniería nanométrica. De entrada, está hecha del material perfecto: magnetita o greigita, minerales de hierro ambos muy magnéticos. Tampoco es un accidente que conste de varios cristales. A escalas muy pequeñas, cuanto mayor es una partícula magnética más tiempo permanece imantada. Pero si la partícula excede cierto tamaño, originará espontáneamente dos dominios magnéticos, con imantaciones dirigidas en sentidos opuestos. Un cristal así tiene una magnetización total pequeña y no es una aguja de brújula muy eficiente. La bacteria, al hacer sus brújulas con cristales que alcanzan justo el tamaño apropiado para existir como un solo dominio magnético estable, saca el mayor partido de cada fracción de hierro que utiliza. El hombre sigue esa misma estrategia cuando prepara medios de almacenaje en disco duro y emplea nanocristales de un tamaño que les haga ser a la vez estables y fuertes.

La investigación biomédica podría servirse pronto de cristales magnéticos artificiales de dimensiones similares. Dos grupos, uno en Alemania y el otro en la Universidad de California en Berkeley, están explorando la posibilidad de recurrir a nanopartículas magnéticas para detectar microorganismos patógenos.

Su método requiere anticuerpos adecuados que atrapen microorganismos patógenos específicos. Las partículas magnéticas se fijan, a modo de etiquetas, a los anticuerpos seleccionados, que se administran entonces a la muestra en estudio. Para comprobar si esos anticuerpos sonda se han unido al conjunto de microorganismos patógenos, se aplica un campo magnético intenso (que imanta transitoriamente las partículas) y se examinan el espécimen con un instrumento sensible, capaz de detectar los campos magnéticos débiles que emanan entonces de tales sondas. Los anticuerpos etiquetados que no se han trabado van dando rumbos por la solución sin emitir ninguna señal magnética. Pero los anticuerpos trabados no pueden girar, y la suma de sus etiquetas magnéticas genera un campo magnético que se detecta con facilidad.

Como las sondas sin trabar no producen señal, este procedimiento prescinde de los sucesivos lavados acostumbrados en tales ensayos, en los que se invierte mucho tiempo. La sensibilidad lograda con esta técnica experimental supera ya la de los métodos ordinarios; con las mejoras del dispositivo que se esperan, deberá ser cientos de veces mayor.

Pese a las ventajas, no es probable que el método magnético obligue a abandonar al procedimiento habitual de marcar las sondas con una etiqueta fluorescente: una molécula orgánica que resplandece con un tono característico cuando la excita la luz de un determinado color. Los colores son muy útiles en varios procedimientos diagnósticos y de investigación; por ejemplo, cuando se exige el rastreo de más de una sonda.

c. En la electrónica

La tendencia inexorable a fabricar dispositivos cada vez menores y mejores, quizá no deje otra opción que cambiar de raíz y mirar hacia una nueva forma de electrónica donde moléculas creadas a propósito sustituyan a los transistores de los circuitos actuales. Para algunos, ese cambio obligado podría darse antes de 10 años.

Un ordenador de uso general requiere de un dispositivo de conmutación de memoria y una forma de conectar arbitrariamente múltiples dispositivos y elementos de memoria. Se ha logrado ya fabricar conmutadores y elementos de memoria con moléculas sencillas. El conmutador obtenido consta, sin embargo, de sólo dos terminales, en el que el flujo de corriente entre dos de ellos este controlado por un tercero.

La industria electrónica ha mostrado su interés por desarrollar nuevos métodos para la nanofabricación con el fin de continuar su tendencia a producir dispositivos cada vez más pequeños, más eficientes y menos costosos (nanochips del futuro).

De los experimentos realizados en los últimos años, se han obtenido buenos resultados que permitirán fabricar con nanotubos las conexiones y los dispositivos activos de un tamaño entre 1 y 10 nanómetros.

Se ha determinado que los nanotubos individuales de una sola capa con diámetro de 0.14 nanómetros son superconductores eléctricos a temperatura del orden de 15° k, por lo tanto se utilizan para producir nanocircuitos eléctricos.

Incorporados los nanotubos en circuitos electrónicos, estos operarían rápidamente sin consumir tanta energía como los actuales.

Como se ha mencionado anteriormente, las sorprendentes propiedades eléctricas de los nanotubos, constituye la base principal de las aplicaciones en la electrónica.

Los nanotubos de carbono pueden utilizarse para crear detectores químicos delicadamente sensibles, ya que todos los dispositivos moleculares, incluidos los nanotubos son muy sensibles al ruido producido por las fluctaciones eléctricas, térmicas y químicas.

También los nanotubos de carbono se utilizan para producir pantallas de televisión de ultra y alta definición, ya que los nanotubos de carbono se comportan como emisores de campo que operan con altas intensidades de corriente y bajos voltajes.

La nanoelectrónica vendría, pues, a ser una evolución natural de la microelectrónica. Pero la fotolitografía tradicional es tanto más difícil cuanto más se achican las dimensiones de las estructuras. Por ese motivo se están explorando otras técnicas para fabricación futura de nanochips.

La litografía por haz electrónico es una opción competitiva. Consiste en gravar el esquema del circuito sobre una capa delgada de polímero por medio de un haz de electrones. Estos haces no se difractan a escala atómica, y por tanto no difuminan los bordes de las líneas trazadas.

Se ha recurrido a esta técnica para gravar líneas de sólo unos nanómetros de anchura en una capa fotosensible (rotorresina) extendida sobre un sustrato de silicio. El silicio es un semiconductor; su resistividad a la corriente eléctrica a temperatura ambiente varía entre la de los metales y la de los aislantes. La conductividad del silicio se puede controlar añadiendo pequeñas cantidades de impurezas llamadas dopantes. La capacidad de controlar las propiedades eléctricas del silicio y su abundancia en la naturaleza han posibilitado el

desarrollo y aplicación de los transistores y circuitos integrados (nanochips) que se utilizan en la industria electrónica.

Nada parece ahora impedir la creación de un nanocircuito dotado de conexiones, conmutadores y elementos de memoria construidos con nanotubos.

d. De los puntos cuánticos

La compañía a la cabeza del empeño por comercializar esta técnica la Quantum Dot Corporation, posee los derechos de las técnicas desarrolladas en el laboratorio de la Universidad de California en Berkeley y en el Instituto de Tecnología de Massachussets, la Universidad de Indiana, el Laboratorio Nacional Lawrence en Berkeley y la Universidad de Melbourne..

Los nanocristales semiconductores presentan varias ventajas sobre los marcadores moleculares cromáticos al uso. Los cristales inorgánicos pueden soportar un número de ciclos de excitación y fotoemisión bastante mayor que las moléculas orgánicas corrientes, que se degradan enseguida. Gracias a esa estabilidad podemos seguir lo que va sucediendo en las células y tejidos durante intervalos largos. Pero el mayor beneficio de los nanocristales semiconductores es menos sutil. Existen en más colores.

Los sistemas biológicos, muy complejos, nos obligan con frecuencia a observar varios componentes a la vez.

Cuesta lograr ese seguimiento porque los distintos colorantes orgánicos se excitan con longitudes de onda diferentes. Pero los puntos cuánticos admiten que se marquen múltiples moléculas biológicas, cada una con un cristal de un tamaño (y por lo tanto de un color) diferente. Puesto que todos esos cristales se activan con una sola fuente de luz, los podemos rastrear al unísono.

Se está trabajando con ahínco en este método. No terminan ahí, sin embargo, las posibilidades que ofrecen los puntos cuánticos, sea una perla de látex rellena con una combinación de puntos cuánticos, la cuenta podría contener puntos de cinco tamaños, vale decir, de cinco colores diferentes, con diversas concentraciones de cada uno. Una vez iluminada, la cuenta emitirá luz, que, dispersada por un prisma, producirá cinco líneas espectrales nítidas, con las intensidades que se hayan prescrito: una suerte de código de barras espectral. Con perlas así se dispone de un número enorme de etiquetas (en potencia, miles de millones), cada una de las cuales podría pegarse a moléculas de ADN compuestas de secuencias diferentes de elementos genéticos.

Estas cuentas permiten cotejar fácilmente el material genético de una muestra con una biblioteca de secuencias de ADN conocidas (podría proceder así el investigador que quisiese saber qué genes están activos en ciertas células o tejidos). Para ello bastaría con exponer la muestra a toda la biblioteca de cuentas y leer los códigos de barras espectrales de los ADN de la biblioteca que se acoplasen con las secuencias de la muestra. Como las secuencias genéticas sólo se acoplan cuando coinciden (cuando una secuencia es complementaria de la otra), los resultados revelarían de inmediato la naturaleza del material genético de la muestra.

Los puntos cuánticos semiconductores no son las únicas nanoestructuras que nos facultan para manifestar ópticamente la composición genética de un espécimen biológico. Los trabajos de Chad A. Mirkin y Robert L. Letsinger, de la Universidad del Noroeste, ofrecen otro ejemplo de esa capacidad. Su ingenioso método permite comprobar la presencia de una secuencia genética en una solución por medio de partículas de oro, de 13 nanómetros, ornadas de ADN. Trabajan con dos grupos de partículas de oro. El primero porta un ADN que se acopla a una mitad de la secuencia diana; el segundo grupo, ADN que se acoplan a la otra mitad. El ADN con la secuencia diana entera se engarza enseguida a ambos tipos de partículas y conecta a éstas entre sí. Como cada partícula tiene múltiples tentáculos de ADN, los segmentos de material genético que lleven la secuencia diana aglutinarán muchas partículas. Y cuando esas partículas de oro se agregan, sus propiedades ópticas cambian notablemente; la solución de prueba pasa de roja a azul. Como es fácil ver el resultado de la prueba, un sistema así resultaría óptimo para hacer pruebas domésticas de ADN.

Ninguna exposición de la Nanotécnica aplicada a la biología estaría completa si olvidáramos la instrumentación. En particular, el microscopio de fuerza atómica, aparato que sondea los materiales a la manera en que el viejo fonógrafo leía los surcos del disco: arrastrando una punta afilada sobre la superficie y detectando las desviaciones que vaya habiendo. Pero la punta de un microscopio de fuerza atómica es mucho más fina que la aguja del fonógrafo; puede, pues, captar estructuras mucho menores. No fue tarea fácil fabricar puntas finas y poderosas.

La solución apareció en 1996 investigadores de la Universidad de Rice fijaron un angosto nanotubo de carbono a la punta de un microscopio de fuerza atómica y, de esa forma, éste pudo sondear muestras de sólo unos nanómetros de tamaño. En 1998, Charles M. Lieber y su grupo, de la Universidad de Harvard, aplicaron la idea al sondeo de biomoléculas y proporcionaron un medio de muy alta resolución para la exploración de moléculas biológicas complejas y sus interacciones al nivel más básico.

Quizás el microscopio de fuerza atómica no se limite pronto a hacer mediciones científicas fundamentales. El año pasado Jame K. Gimzewski, del laboratorio de investigación de IBM en Zurich, mostró, con sus colaboradores de IBM y de la Universidad de Basilea, que con una serie de brazos micrométricos, o repisas muy parecidos a los que se utilizan en los microscopios de fuerza atómica, se podían examinar las muestras y buscar en ellas ciertas secuencias genéticas. Adhirieron hebras cortas de ADN a las partes de arriba de las repisas. Cuando un material genético que incluye una secuencia complementaria se acopla a las hebras sujetas a las repisas, genera una tensión superficial que dobla a éstas ligerísimamente – sólo unos nanómetros-, lo suficiente para que se detecte. Debería bastar con fabricar un dispositivo con muchas repisas y cubrir cada una con tipos diferentes de ADN para comprobar rápidamente si una muestra biológica posee determinadas secuencias genéticas (como se hace ahora rutinariamente por medio de los chips genéticos) con medios nanométricos y sin tener que etiquetar.

Este ejemplo nos revela que las conexiones entre la nanotécnica y la práctica de la medicina son a menudo indirectas: buena parte de los nuevos trabajos sólo prometen mejores instrumentos para la investigación o ayudas para el diagnóstico. Pero en algunos casos los nano-objetos que se están desarrollando podrían

cumplir misiones terapéuticas. Piénsese en fármacos encapsulados en envases nanométricos que controlasen la administración precisa del medicamento.

Por ejemplo, los dendrímeros orgánicos. Hace veinte años Donald A. Tomalia, del Instituto Molecular de Michigan en Midland, construía los primeros prototipos. La molécula de dendrímero se va ramificando sucesivamente de adentro afuera. De estructura globular, alcanzan el tamaño de las proteínas. Divergen de éstas, sin embargo, en que no se degradan ni se despliegan con facilidad; se lo impiden unos enlaces químicos más fuertes.

Los dendrímeros, caracterizados por su enorme área superficial interna, pueden configurarse de manera que presenten cavidades con tamaños diferentes. Esos espacios son ideales para albergar agentes terapéuticos. Podrían transportar ADN hasta el interior de las células para una terapia génica. Operación que realizaría sin el peligro potencial de otro vector importante, los virus modificados genéticamente.

Aunque no son las únicas estructuras portadoras de fármacos merced a su extensa superficie, los dendrímeros ofrecen un mayor grado de control y flexibilidad.

Quizá se llegue a la creación de modelos que espontáneamente se hinchen y liberen la medicina en presencia de moléculas estimuladoras del proceso. Un tal dendrímero, cortado a la medida, soltaría su carga medicinal en los tejidos u órganos indicados.

No podemos olvidar, entre los vectores, las cápsulas poliméricas huecas que estudia Helmut Möhwald, del Instituto Max Planck de Coloides e Interfases de Golm. En respuesta ante ciertas señales, las cápsulas se hinchan o comprimen y liberan la carga.

Mención aparte merecen unas perlititas de vidrio recubiertas de oro, las nanocascarillas, inventadas en la Universidad de Rice. Aunque podrían fabricarse de manera que absorban luz de casi cualquier longitud de onda, las nanocascarillas que captan energía del infrarrojo cercano son las más interesantes, pues esas longitudes de ondas atraviesan fácilmente varios centímetros de tejido. Con una fuente intensa de infrarrojo podemos calentar desde el exterior nanocascarillas inyectadas en el cuerpo: en consecuencia, podría intentarse que una nanocascarilla administrase las moléculas del fármaco en instantes determinados uniéndolo a una cápsula hecha de un polímero sensible al calor. La cápsula soltaría su contenido cuando la deformase el calentamiento suave de la nanocascarilla que llevase adherida.

Se ha pensado aplicar también las nanocascarillas a la oncoterapia, mediante la unión de las esferas doradas a anticuerpos que se traben específicamente con células tumorales. En teoría, bastaría con calentar las nanocascarilla para destruir las células cancerosas sin que sufrieran daños los tejidos circundantes.

Nadie sabe a ciencia cierta si las nanocascarillas acabarán por materializar todo cuanto prometen. Ni si lo harán la legión de nanoestructuras que se están desarrollando con fines médicos, entre ellas las buckybolitas de un nanómetro creadas con unas cuantas docenas de átomos de carbono. Pese a todo, parece probable que algunos de esos dispositivos encontrarán su sitio en la práctica médica de aquí a pocos años.

Hemos de contar, además, con la perspectiva de estructuras mayores, realizadas con elementos nanométricos, que emiten los procesos naturales de la vida. Esos materiales podrían servir para reparar tejidos deteriorados. Ya se han construido armazones donde crece hueso. Samuel I. Stupp, de la universidad del noroeste, pionero de este método, combina moléculas sintéticas para formar fibras a las que las células óseas tienen una fuerte tendencia a adherirse.

Entre los “grandes retos” de la Iniciativa Nanotécnica Nacional figura la detección precoz de tumores. Además, los investigadores confían en regenerar no sólo hueso, cartílago o piel, sino también órganos complejos por medio de armazones artificiales que guíen la actividad de las células.

e. En la actualidad

No toda la nanotécnica está a 20 años de distancia, como indica el siguiente muestreo de aplicaciones ya comercializadas. *Investigación y Ciencia*(Gary Stix, 2001).

APLICACIÓN: CATALIZADORES

COMPAÑÍA: EXXONMIBIL

DESCRIPCIÓN: Zeolitas, minerales con poros de tamaño inferior un nanómetro, que sirven de catalizadores de suma eficacia para disgregar o partir las grandes moléculas de hidrocarburo y formar gasolina

APLICACIÓN: ALMACENAMIENTO DE DATOS.

COMPAÑÍA: IBM

DESCRIPCIÓN: En los años más recientes, los controladores de discos han incorporado capas nanométricas –que explotan el efecto magnetorresistencia gigante– para lograr una elevada densidad de almacenamiento de datos.

APLICACIÓN: ENCAPSULADO DE FÁRMACOS

COMPAÑÍA: GILEAD SCIENCES

DESCRIPCIÓN: Esferitas de lípidos, llamadas liposomas, de unos 100 nanómetros de diámetro, que encapsulan un fármaco anticáncer para el tratamiento del sarcoma de kaposi asociado al SIDA.

APLICACIÓN: FABRICACIÓN CON MATERIAS PRIMAS

COMPAÑÍA: CARBÓN NANOTECHNOLOGIES

DESCRIPCIÓN: Fundada entre otros por Richard Smalley, descubridor de las buckybolos, la empresa utiliza un proceso de fabricación nuevo para abaratar los nanotubos de carbono.

APLICACIÓN: MEJORA DE MATERIALES

COMPAÑÍA: NANOPHASE TECHNOLOGIES

DESCRIPCIÓN: Se incorporan partículas nanocristalinas a otros materiales para producir cerámicas más duras, filtros solares transparentes que detengan la radiación infrarroja y ultravioleta, y catalizadores para aplicaciones ambientales o de otro tipo.

V. PERSPECTIVAS Y CONCLUSIONES

Hasta fines del siglo pasado las propiedades requeridas en los materiales eran la resistencia, la dureza, sus conductas eléctricas y magnéticas, para producirlos en gran escala. Lo que antes parecía una ambición absurda, se ha convertido ahora en una meta ampliamente compartida. Decenios de progreso técnico han reducido la microelectrónica hasta los umbrales de esta escala molecular, mientras que el progreso científico en el dominio molecular (sobre todo, en los mecanismos moleculares de los sistemas vivos) ya han conseguido que muchos admitan lo que un genio imaginaba hace tanto tiempo.

Ahora los efectos de reducción de tamaño originan dos grandes retos: primero, cómo caracterizar adecuadamente las nanopartículas, y segundo, cómo utilizar sus propiedades nuevas—por ejemplo almacenar información, diferentes propiedades ópticas—para crear objetos macrométricos a partir de unidades estructurales nanoescalares.

La nanotecnología ofrece expectativas muy amplias en avances médicos, materiales más inteligentes y más ligeros, sistemas energéticos más limpios, dispositivos electrónicos más rápidos, eficientes y multifuncionales, como mayor adaptabilidad, autorregulación, autodiagnóstico y autoreparación. *Educación Química*(Castellanos, 2003).

Para desarrollar estos nuevos materiales es necesario la combinación de esfuerzos en investigación de diversas disciplinas: química de materiales, ciencia e ingeniería de materiales, ingeniería genética y de tejidos, química orgánica, bioquímica, nanofabricación, tecnologías avanzadas de la información, etcétera, especialmente en el caso de la nanotecnología.

Inspirados por la técnica molecular, los estudios sobre nanotecnología avanzada se han centrado en la construcción de abajo arriba, en la cual las máquinas moleculares ensamblan bloques, o componentes, básicos para formar productos, nuevas máquinas moleculares incluidas.

La biología nos revela que los sistemas de máquinas moleculares y sus productos pueden fabricarse económicamente en cantidades industriales.

La capacidad de construir objetos con exactitud molecular revolucionará la fabricación, permitiendo mejorar las propiedades de los materiales y las prestaciones de los mecanismos. Además, cuando un proceso de producción

controla cada uno de los átomos, nada justifica los vertidos tóxicos al aire o a las aguas.

Asimismo, las mejoras en la fabricación abaratarían las células solares y los sistemas de almacenamiento de energía, disminuyendo las demandas de carbón y petróleo y reduciendo aún más la contaminación. Esos adelantos suscitan esperanzas de que los pueblos del mundo en desarrollo puedan alcanzar los niveles de vida del Primer Mundo sin causar un desastre ecológico.

El Premio Nobel Richard E. Smalley opina que el problema número uno que enfrentará la humanidad en los próximos 50 años será el de encontrar fuentes alternas de energía, pues para entonces habrá de 8 a 10 mil millones (10^9) de habitantes en el mundo que requerirán 30 a 60 terawatts (10^{12}) de energía diarios. Él cree que la revolución de la nanotecnología facilitará el uso de fuentes alternas: fotoconversión directa de luz y agua para producir hidrógeno, nuevas celdas de combustible, mejor almacenamiento de hidrógeno, nuevas y mejores baterías, y cables construidos de superconductores o conductores cuánticos.

Unos materiales baratos, livianos y muy robustos aumentarían mucho el rendimiento energético de los transportes y, en definitiva, la economía de los desplazamientos espaciales.

Una vez más parecen viables los viejos sueños de expandir la biosfera más allá de nuestro planeta. Quizás el objetivo más excitante sea la reparación molecular del cuerpo humano. Se vislumbra robots médicos nanométricos que podrían destruir virus y células cancerosas, reparar estructuras dañadas, eliminar acumulaciones de residuos del cerebro y devolver el cuerpo a su estado juvenil.

Otra sorprendente aplicación médica sería la eventual capacidad de reparar y revivir a esos pioneros en estado de animación suspendida (considerados legalmente fallecidos), incluso los que fueron preservados mediante la técnica de almacenamiento criogénico de los años sesenta. Las técnicas de verificación de hoy, que evitan la formación de los dañinos cristales de hielo, deberían hacer más fácil la reparación, pero el propio proceso original parece que preserva la estructura cerebral lo suficientemente bien para facilitar la restauración.

Se prevé que la base técnica de tales posibilidades estará quizá lista dentro de unas tres décadas. Por ahora, los trabajos se centran en las etapas iniciales: descubrir cómo construir estructuras mayores con exactitud atómica, aprender a diseñar máquinas moleculares e identificar los objetivos intermedios con buenos resultados.

Para entender el potencial de la técnica de fabricación molecular, conviene fijarse en los macrosistemas de máquinas empleados en la industria. Imagínese un brazo robótico que se coloca sobre una correa transportadora, recoge un útil cargado, aplica éste a una pieza en proceso, retorna el útil vacío a la correa, recoge el siguiente útil cargado, y así sucesivamente, tal como en las fabricas automatizadas modernas.

Ahora, mentalmente, hagamos que todo ese mecanismo encoja, correa transportadora incluida, hasta dimensiones moleculares para imaginarnos un sistema de construcción a escala nanométrica. Con una variedad suficiente de útiles, ese sistema sería un dispositivo de montaje de uso general, llamado

ensamblador. En principio, sería capaz de construir cualquier cosa, hasta una copia de sí mismo.

Como campo de la nanotécnica molecular no depende de la factibilidad de ese propósito concreto; un conjunto de dispositivos de montaje menos general podría llevar acabo las funciones antes mencionadas. Pero la idea de ensamblador sigue siendo contravertida, vale la pena mencionar las objeciones que suscita.

En un encuentro reciente patrocinado por la Asociación Americana para el Progreso de la Ciencia, se preguntaba cómo podría alimentarse de energía y gobernarse un ensamblador y si de veras podría romper y reconformar unos enlaces moleculares fuertes. A tan razonables preguntas puede responderse exponiendo diseños y cálculos ya realizados.

También se objetaba que un ensamblador necesitaría diez dedos robóticos para ejecutar sus operaciones y que no hay espacio suficiente para todos ellos. Pero la necesidad de un número tan elevado de dedos nunca se ha comprobado y ni siquiera razonado en serio. Por contraste, los diseños que han sufrido (y resistido) los escrutinios más severos usan un útil cada vez y los hacen sin emplear dedo alguno.

Es importante que las críticas a la nanotécnica se hagan con acierto, pues de ellas dependen decisiones vitales para la sociedad. Si la nanotécnica molecular, tal como se describe aquí, es correcta, las cuestiones de política pueden aparecer muy distintas de cómo generalmente se espera. La mayoría de la gente cree que el calentamiento global será difícil de corregir, pero con la nanotecnología el exceso de gases del efecto invernadero podría eliminarse de la atmósfera con poco dinero.

Las proyecciones actuales de la Seguridad Social dan como hecho una población anciana creciente y de salud deficiente. Con una nanotécnica médica avanzada, los mayores del mañana podrían ser más activos y sanos que los de hoy, confiriendo un significado nuevo a los años dorados.

La nanotecnología crece a pasos agigantados, y se incorpora como asunto de prioridad estratégica económica y militar en los países desarrollados, como se puede apreciar de la reciente aprobación de un gasto aproximado de 2.4 millardos (10^9) de dólares para los próximos tres años en la Unión Americana, comparado con los 324 millones de dólares aprobados en el año 2000. Las inversiones correspondientes en Japón (210), Alemania (75.6), Reino Unido (46.8) y Francia (22.8) en millones de dólares, del año 2000, también son significativas (Editorial MRS, 2003).

Igualmente, tenemos ahora que centrarnos en la evitación de accidentes y en prevenir el abuso de esta poderosa técnica. Se ha realizado un trabajo bien fundamentado respecto a la prevención de accidentes importantes. Las pautas de previsión, disponibles en la telaraña mundial, esbozan las normas de seguridad propuestas.

Pero el reto de evitar el abuso (la de esta técnica por gobiernos agresivos y grupos terroristas para sus propios fines) aún se alza muy amenazador. En estos días la analogía más afín a este problema es la dificultad para controlar la proliferación de armas químicas y biológicas.

Casi todos los esfuerzos encaminados a reducir el tamaño de las máquinas de cómputo dan por hecho que éstas van a seguir, en gran medida, funcionando sirviéndose de electrones para trasladar la información y de transistores para procesarla. Sin embargo, una computadora nanoescalar podría fundarse en medios distinto. Una de las posibilidades más apasionantes consiste en sacar partido del ADN, el portador de la información genética en los seres vivos.

La molécula de la vida puede almacenar vastas cantidades de datos en sus secuencias de cuatro bases (adenina, guanina, timina y citosina). Las enzimas naturales manipulan tal información con muy alto grado de paralelismo. La potencia de los métodos basados en ADN fue puesta de manifiesto por Leonard M. Adleman en 1994, quien demostró que una computadora fundada en ADN podía resolver un tipo de problema que resulta especialmente difícil con las computadoras ordinarias (Adleman, 1998) [véase "Computación con ADN," por Leonard M. Adleman, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1998].

Si el alcance de la nanotecnología se puede apreciar por el número de revistas donde se publican artículos relacionados, como un reflejo de los grupos científicos que están trabajando en el tema, entonces es verdaderamente abrumador, porque aparte de las revistas especializadas en el tema, casi todas las demás en algún momento incluyen temas relacionados con asuntos en la escala nanométrica.

Ciertamente, el catalizador para una futura revolución industrial y cultural que lleve a grandes mejorías en la calidad de vida al ofrecer una fabulosa variedad de aplicaciones, es la NANOTECNOLOGIA.

Y como muy bien lo expresó Richard Feynman: "Hay mucho espacio en el fondo".

APÉNDICE 1. Estructura de los materiales

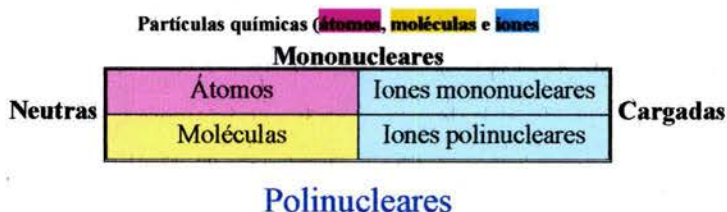
Materiales y sustancias

A continuación se presentan algunas definiciones y se discuten algunos conceptos básicos relacionados con la estructura de la materia con el fin de ubicar el tema de la nanotecnología:

Materiales.- De lo que están hechos los objetos , los seres y los cuerpos. Un determinado material puede estar constituido por una o varias sustancias.

Sustancia.- Constituyente de un cierto material. Posee un conjunto de propiedades específicas que la distinguen de las demás sustancias. Consiste de unas pequeñas partículas llamadas *iones*, *moléculas* o *átomos*. Las propiedades macroscópicas de las sustancias son consecuencia de la estructura interna y de las interacciones de sus partículas. Se tienen registradas más de 22 millones de sustancias.

Partículas químicas.- Son las pequeñas unidades que integran a una sustancia. Son muy pequeñas y muy ligeras. Tanto que en unos cuantos gramos de cualquier sustancia hay del orden de un cuatrillón de partículas. Están constituidas por un cierto número de núcleos (con carga eléctrica positiva) interactuando con un cierto número de electrones (con carga eléctrica negativa). Pueden ser **iones** (cargadas mono o polinucleares), **moléculas** (polinucleares neutras) o **átomos** (mononucleares neutras). Su tamaño está determinado por la región que ocupan los electrones más externos, es decir, los de la última capa.



En itálicas: partículas inestables en forma aislada en condiciones cercanas a las de la superficie terrestre.

Núcleos.- Son la parte positiva de las partículas químicas. Concentran la mayor parte de la masa de las partículas que constituyen. Están formados por protones (partículas nucleares con carga positiva) y neutrones (partículas nucleares neutras)

Electrones.- Son la parte negativa de las partículas químicas. Debido al Principio de Incertidumbre de Heisenberg no se puede saber ni su forma ni su tamaño ni cómo se mueven. Se distribuyen por capas alrededor de los núcleos.

Los electrones más externos (los de la última capa) ocupan regiones tan grandes como las propias partículas químicas a que pertenecen

³ <http://www.cas.org/>

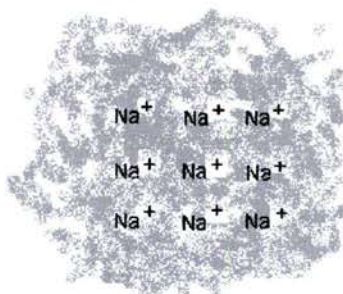
Interacciones eléctricas. Dada la naturaleza eléctrica de las partículas químicas, es decir, dado que están constituidas por núcleos positivos y electrones negativos, la estructura de las sustancias moléculas discretas, redes metálicas, redes iónicas o redes covalentes es simplemente la consecuencia o el resultado de la interacción eléctrica entre sus partes.

Las interacciones más complejas no pueden ser descritas adecuadamente más que mediante el modelo de la Mecánica Cuántica. Es el caso del enlace covalente típico un par de electrones interactuando con un par de núcleos y el del enlace covalente metálico todos los electrones de valencia interactuando con todos los núcleos.

Sin embargo, otras interacciones sí pueden describirse satisfactoriamente con modelos electrostáticos clásicos: las interacciones iónicas y las interacciones dipolares (o de Van der Waals). En las primeras, los iones se modelan como cargas puntuales. En las segundas, las moléculas se modelan como dipolos eléctricos.

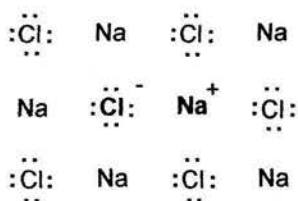
Clasificación de sustancias. De una manera muy gruesa, todas las sustancias se pueden clasificar en cuatro grandes categorías:

– **Sustancias Metálicas (M).** Conducen la electricidad en estado líquido y en estado sólido. Están constituidas por enormes entramados de tamaño indefinido llamados *redes metálicas*. La estructura de la red consiste en un número muy grande de iones positivos (cationes) interactuando eléctricamente con un “mar de electrones”. Ejemplos: Na, Hg, U, Pb, etc. Por definición, los otros 3 tipos de sustancias (iónicas, covalentes no moleculares y covalentes moleculares) se consideran no metálicas.

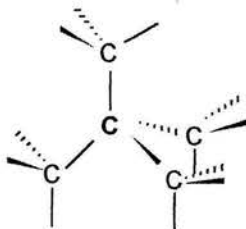


Sustancias Iónicas (I). Conducen la electricidad en estado líquido y en solución acuosa pero no en estado sólido. Están constituidas por enormes entramados de tamaño indefinido llamados *redes iónicas*. La estructura de la red consiste en un número muy grande de iones de carga opuesta (aniones y cationes) interactuando

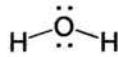
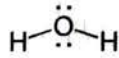
eléctricamente. Ejemplos: NaCl, NH₄NO₃, etc. Por definición, las otras 3 categorías (metálicas, covalentes no moleculares y covalentes moleculares) son sistemas covalentes.



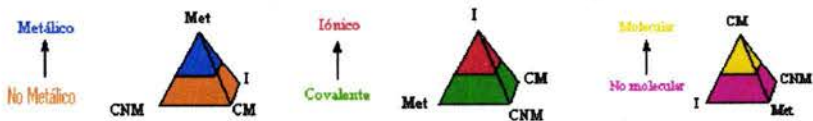
- **Sustancias Covalentes No Moleculares (CNM).** No conducen la electricidad ni en estado líquido, ni en estado sólido ni en solución acuosa. Tienen puntos de fusión muy elevados. Están constituidas por enormes entramados de tamaño indefinido llamados *redes covalentes*. La estructura de la red consiste en un número muy grande de núcleos y electrones conectados entre sí mediante una compleja cadena de *enlaces covalentes* típicos (la interacción eléctrica entre 2 núcleos y un par de electrones). Ejemplos: diamante (C), cuarzo (SiO₂), etc.

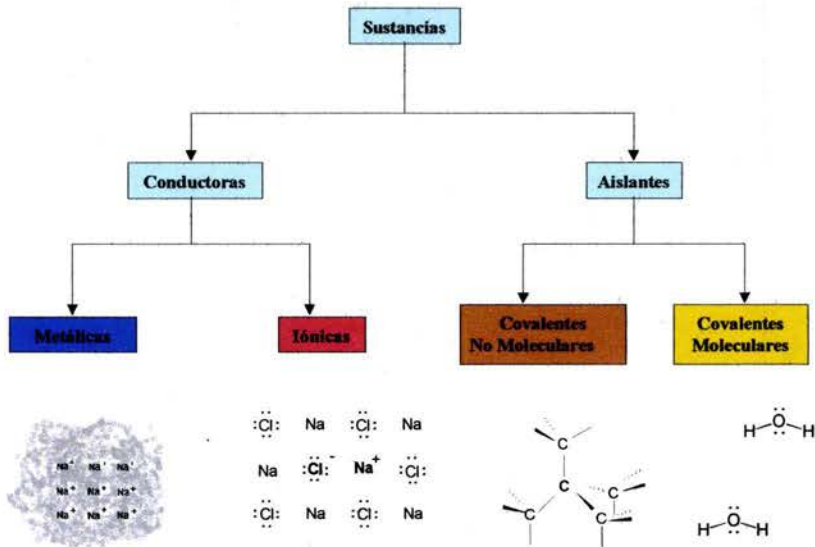


- **Sustancias Covalentes Moleculares (CM).** No conducen la electricidad ni en estado líquido, ni en estado sólido ni en solución acuosa. Tienen bajos puntos de fusión. Consisten de átomos o moléculas estables interactuando —si acaso— muy débilmente entre sí. En las sustancias gaseosas, la interacción entre partículas es prácticamente nula. Para fines prácticos se trata de partículas independientes. En las sustancias líquidas, la interacción entre partículas ya es significativa, lo cual hace que estén muy cerca unas de otras aunque todavía con mucho movimiento debido a sus altas velocidades.
- Las sustancias sólidas de esta categoría también consisten de redes pero con la diferencia de que los puntos reticulares son ocupados por moléculas y no por iones. Por definición, las otras 3 categorías (metálicas, iónicas y covalentes no moleculares) son sistemas no moleculares.



Esta clasificación en 4 categorías independientes es útil para fines de clasificación. Sin embargo, en la realidad, las fronteras entre ellas no son fáciles de delimitar. Más bien se trata de un espectro continuo, donde las categorías son en realidad los casos límite o ideales. Esto se puede ilustrar con un tetraedro donde las categorías definidas ocupan los vértices. Girando el tetraedro podemos distinguir las conocidas dicotomías: iónico-covalente, metálico-no metálico y molecular-no molecular.





Interacciones descritas mediante la mecánica cuántica

A pesar de que percibimos a la emisión de radiaciones electromagnéticas como un fenómeno exclusivamente ondulatorio y al movimiento de los cuerpos como exclusivamente corpuscular, hoy sabemos que ambos comportamientos —corpuscular y ondulatorio— son de alguna manera complementarios.

Hay algunos cuerpos —como los electrones— con un marcado comportamiento ondulatorio. Al pasar a través de pequeños cristallitos metálicos, los electrones se dispersan en todas direcciones formando patrones típicos de difracción, en vez de continuar su trayectoria en una sola dirección como sería el comportamiento esperado de un cuerpo cualquiera. De hecho, los modernos microscopios electrónicos se basan precisamente en esta sorprendente naturaleza dual (corpuscular-ondulatoria) de los electrones.

Así mismo, hay algunas radiaciones electromagnéticas, como las de los rayos gamma y las de los rayos X, con un notorio comportamiento corpuscular. Ciertos fenómenos se explican mejor suponiendo que la energía de las radiaciones electromagnéticas se transmite por pulsos (partículas de luz o fotones) que de manera continua. Por ejemplo, la conversión de energía luminosa en energía eléctrica a través de las celdas solares.

La naturaleza dual de la materia se manifiesta matemáticamente en la relación que propuso Louis De Broglie en 1924:

$$\lambda p = h$$

donde λ es la longitud de onda y p es el momento lineal, es decir, $p = mv$

Considerando que λ es una característica típica de las ondas y que p lo es de los cuerpos en movimiento, la ecuación anterior se puede interpretar en el sentido de que los comportamientos ondulatorio y corpuscular son inversamente proporcionales. Así, longitudes de onda grandes implican predominio del comportamiento ondulatorio y, correspondientemente, momentos lineales grandes (muchas veces debido a valores de la masa muy altos) describen sistemas donde el comportamiento corpuscular predomina.

Las radiaciones electromagnéticas con longitudes de onda muy cortas —como los rayos X y los rayos γ — así como los cuerpos extraordinariamente ligeros —como los electrones— son casos excepcionales en los que no predomina ninguno de los dos comportamientos. Es decir, para este tipo de sistemas ambos comportamientos, el corpuscular y el ondulatorio, son prácticamente igual de importantes. En consecuencia, exhiben, según el experimento que se diseñe, los dos comportamientos. Así, un fotón de radiación γ se parece más a un electrón que a un “fotón” de radio y televisión. Del mismo modo, un electrón se asemeja más un fotón de radiación γ que a una canica.

Para describir adecuadamente las interacciones eléctricas —que ocurren en el interior de las partículas químicas— entre núcleos y electrones se requiere considerar la naturaleza dual de la materia. La rama de la física que hace esto es la Mecánica Cuántica.

Las dos consecuencias más importantes de incorporar la naturaleza dual de la materia a la descripción de las partículas químicas son **la deslocalización electrónica** y **la cuantización de la energía**.

Deslocalización electrónica.- Los cuerpos se pueden localizar en el espacio con toda precisión. Se puede decir dónde están, qué forma tienen, dónde empiezan y dónde acaban. Lo anterior no tiene tanto sentido si se aplica a fenómenos ondulatorios. Por ejemplo, ¿dónde está la onda de la radiación solar que está llegando en este momento a nuestro planeta? Está en muchos lugares al mismo tiempo, de hecho, en una esfera de 150,000 km de radio alrededor del Sol. ¿Dónde empieza y dónde acaba una onda que, por definición, es una perturbación que viaja? ¿Dónde empieza y dónde acaba una radiación electromagnética que recorre 300 mil kilómetros cada segundo? En fin, la deslocalización no es nada inusual en los fenómenos ondulatorios.

Los electrones, al tener un evidente comportamiento ondulatorio, no son fáciles de localizar. De hecho, lo más que se puede hacer respecto a la localización de los electrones —incluso con la poderosa herramienta matemática de la mecánica cuántica— es esbozar unas enormes zonas en el espacio donde la posición exacta del electrón es incierta. Estas zonas de incertidumbre se llaman dominios electrónicos (Gillespie) y pueden llegar a ser tan grandes como los propios átomos, moléculas e iones. De hecho, el tamaño de las partículas químicas está determinado por el tamaño de los dominios electrónicos más externos.

El no poder localizar con suficiente certeza a los electrones implica que no se puede saber exactamente dónde están (sus coordenadas precisas), ni cómo se mueven, ni qué forma ni qué tamaño tienen.

Cuantización de la energía.- La energía de las radiaciones electromagnéticas no fluye de manera continua sino que se transmite por pequeños pulsos —imperceptibles a escala macroscópica. Estos pulsos de energía se llaman fotones y se dice que la radiación electromagnética consiste de *fotones* (literalmente “partículas de luz”). Dado que estos pulsos se pueden modelar como si fueran cuerpos en movimiento, se considera que son una manifestación del comportamiento corpuscular de las radiaciones electromagnéticas.

Por otro lado, las partículas químicas no son más que núcleos y electrones interactuando eléctricamente. Si las atracciones (entre cargas opuestas) son muy superiores a las repulsiones (entre cargas iguales) la energía del sistema será muy baja. Conforme aumenta la importancia de las repulsiones, la energía del sistema se va haciendo mayor. Cuando las repulsiones superan a las atracciones, la partícula ya no puede ser estable y se desintegra.

Hay un número infinito de posibles estados para cada sistema. Sin embargo, para pasar de uno a otro se requiere del intercambio de cantidades exactas de energía. Si se les aplica energía, las partículas pasan de un estado de baja energía a otro de mayor energía. Se dice que la partícula *absorbió* energía. Esto quiere decir que la energía fluyó de los alrededores hacia la partícula. Del mismo modo, si la partícula regresa de un estado de alta energía a uno de menor energía, *emite* una cantidad exacta de energía hacia los alrededores.

El hecho de que no existe un estado posible para cada valor de la energía de las partículas químicas y el hecho de que las radiaciones electromagnéticas consisten de fotones implica que la energía está cuantizada a pequeña escala.

Enlace covalente

Estrictamente, para describir las partículas químicas habría que considerar todas las interacciones existentes entre sus núcleos y electrones. La mecánica cuántica provee los conocimientos y las herramientas matemáticas necesarias para abordar este problema. La complejidad física y matemática de tantas partículas y tantas interacciones requiere de la ayuda de equipos y programas de cómputo (éstos últimos diseñados por los propios expertos en mecánica cuántica).

La descripción de los distintos estados en que se pueden encontrar las partículas químicas se realiza a través de unas funciones matemáticas llamadas *orbitales*.

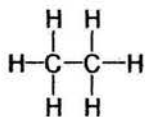
Sin embargo, describir incluso los sistemas más simples (con pocos electrones y pocos núcleos) implica un costo extraordinario en tiempo de cómputo.

Una simplificación, que ha resultado muy útil para los químicos, es la de únicamente contabilizar la interacción entre los *cores* (los núcleos atómicos y los electrones de las capas internas) y los dominios de los *electrones de valencia* (los disponibles de la última capa). Pero ni siquiera todos contra todos, sino de 2 en 2, es decir, mediante fragmentos de un par de electrones interactuando con un par de *cores*. A estos fragmentos se les conoce con el nombre de *enlace covalente* y se representan así:



Donde las letras representan a los *cores* de los elementos X y Y mientras que la raya representa a un par de electrones. Se dice que X y Y están *enlazados* mediante la compartición de un par de electrones. La palabra *covalente* se refiere específicamente a compartir electrones.

De este modo, cualquier partícula polinuclear se puede representar como una cadena de enlaces covalentes (fragmentos "2 a 2"). Por ejemplo, la molécula de etano que contiene 8 núcleos (2 de carbono y 6 de hidrógeno) y 18 electrones se acostumbra representarla así:



A este tipo de representaciones se les llama *Representaciones de Lewis* y obviamente implican una enorme simplificación (de las 325 interacciones que hay en la molécula de etano sólo se consideran las 7 que se muestran en la figura). Detrás de esta simplificación está la hipótesis de que los fragmentos "2 a 2" de las representaciones de Lewis son, en efecto, las interacciones de mayor magnitud e importancia.

Más allá de la mera representación de las partículas, la descripción formal de estas simplificaciones se realiza a través de diversos modelos cuánticos del enlace químico, de los cuales los dos más conocidos son el de *Unión Valencia* y el de *Orbitales Moleculares*.

En particular, el modelo de orbitales moleculares consiste en describir los estados de las partículas polinucleares a partir de los estados de los átomos aislados. Las funciones matemáticas que describen los estados de la molécula (los orbitales moleculares) se pueden construir a partir de las funciones que describen los estados de los átomos aislados (los orbitales atómicos). Esto se logra mediante un conocido proceso matemático: una combinación lineal de funciones.

Un resultado interesante de la aplicación de este modelo es que, para el fragmento “2 a 2” (el enlace covalente típico) por cada 2 estados atómicos se obtienen 2 estados moleculares.

- uno de menor energía que la de los estados atómicos asociado con los dos electrones y los dos cores interactuando. A éste se le llama *estado de enlace*.
- otro posible (o virtual) de mayor energía que la de los estados atómicos al que se puede acceder sólo si los electrones del estado anterior adquieren la suficiente energía. A éste se le llama *estado de antienlace*.

Una descripción menos aproximada de cualquier partícula (polinuclear y polielectrónica) implicaría considerar n estados atómicos y, a partir de ellos, construir n estados moleculares. Dependiendo del número de electrones disponibles, algunos de los estados construidos de esta manera estarían asociados a pares de electrones interactuando con los núcleos. Se dice que se trata de *estados ocupados* (de electrones). Del mismo modo, habría otros estados posibles o virtuales no asociados a ninguno de los electrones presentes. Se dice que son *estados vacíos o desocupados*.

Se sabe que los estados frontera (el más alto ocupado y el más bajo desocupado) tienen mucho que ver con la reactividad de las partículas. Al estado más alto ocupado se le llama HOMO (*Highest Occupied Molecular Orbital* por sus siglas en inglés). Al estado más bajo desocupado se le denomina LOMO (*Lowest Unoccupied Molecular Orbital*).

El modelo de orbitales moleculares es muy importante porque explica la tendencia natural a formar partículas polinucleares: el sistema 2 electrones interactuando con dos cores es de menor energía que el sistema un solo electrón interactuando con un solo núcleo.

Las únicas sustancias que consisten de partículas mononucleares aisladas estables, en las condiciones de presión y temperatura que imperan en la superficie terrestre, son los gases nobles: helio, neón, argón, kriptón, xenón y radón. Es decir, la tendencia natural es a formarse partículas polinucleares (e, incluso, sistemas enormes de muchas partículas interactuando como son las redes metálicas, iónicas y covalentes).

Así, la estructura núcleo-electrónica de las partículas polinucleares se puede modelar, en principio, como una cadena de enlaces covalentes.

Enlace metálico

La aproximación "2 a 2" implica localizar 2 electrones entre 2 *cores*. Sin embargo, la naturaleza dual del electrón hace que a veces un par de electrones esté interactuando, no con dos, sino con 3, 4 o más núcleos. Cuando esto ocurre se dice que es un sistema deslocalizado. Este tipo de sistemas no puede ser modelado con la aproximación "2 a 2" de las representaciones de Lewis.

Sin embargo, el modelo mecano-cuántico de los orbitales moleculares sí es capaz de describir sistemas deslocalizados.

La molécula de benceno es un ejemplo clásico de un sistema deslocalizado. Los 6 electrones π del anillo aromático están deslocalizados en todo el anillo, es decir, son seis electrones interactuando con los seis *cores* de carbono. Mediante el modelo de los orbitales moleculares, se construyen 6 estados moleculares a partir de 6 estados atómicos. Tres de ellos son de enlace (es decir, de menor energía que los estados atómicos) y los otros tres de antienlace (o sea, de mayor energía que los atómicos).

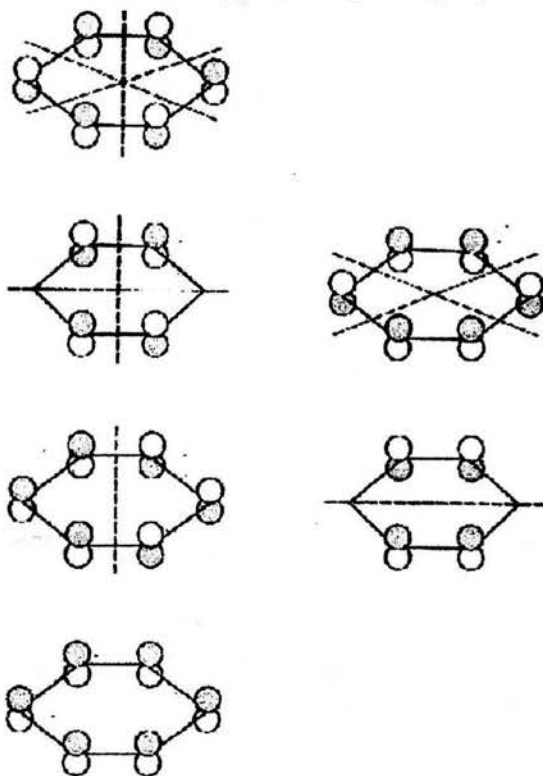


Figura A1. Diagrama de orbitales moleculares del benceno

De hecho, el valor del modelo de los orbitales moleculares es que puede describir básicamente cualquier sistema y no se limita exclusivamente al sistema "2 a 2". Mediante el mismo procedimiento, se pueden combinar n estados atómicos para dar lugar a n estados moleculares. En principio, de los n estados moleculares, la mitad serían de enlace (de menor energía que los correspondientes atómicos) mientras que la otra mitad serían de enlace (más energía que los atómicos).

El caso más extremo de deslocalización electrónica es el que ocurre en las sustancias metálicas. Se trata de un número muy grande de electrones interactuando con un número igualmente grande de *cores*. Si fueran, por ejemplo, un cuatrillón de átomos interactuando (algo así como una pieza de oro de unos 330 g), entonces habría un cuatrillón de estados "moleculares", medio cuatrillón de mayor energía que la de los átomos aislados y el otro medio cuatrillón con menor energía que los átomos aislados.

En este conjunto tan grande de estados es evidente que la diferencia de energía entre 2 estados consecutivos debe ser muy pequeña. Así, en el cristal se forma una serie finita y discreta de niveles energéticos, pero cada uno de ellos tan próximo en energía a sus inmediatos que forman "casi" un sistema continuo de energías. A este conjunto de estados se le conoce como una **banda de estados**. Y a este enfoque se le denomina *Modelo de Bandas*. El modelo de bandas, por lo menos en su interpretación química, puede considerarse como una extensión lógica de la teoría de los orbitales moleculares.

En un cristal de oro, la banda de valencia tiene n estados espaciales. De acuerdo con el Principio de Exclusión de Pauli, sólo puede haber 2 electrones en el mismo estado espacial siempre y cuando ambos electrones tengan espines opuestos. Por lo tanto, el número máximo de electrones en la banda de valencia sería de $2n$. Sin embargo, no hay más que n electrones, uno por cada átomo de oro. En consecuencia, la banda quedaría semillena. El último nivel ocupado se denomina *nivel de Fermi*.

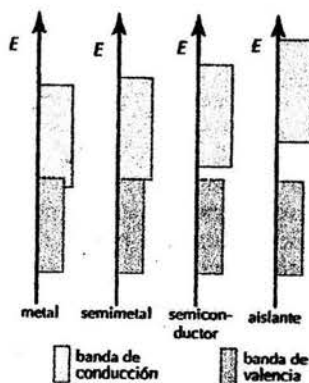


Figura A2. Bandas de conducción y de valencia para distintos materiales.

Sólo en el cero absoluto la distribución de electrones en la banda es tan simple como la indicada en la figura. A temperaturas superiores a 0 K, la propia energía térmica de los electrones hace que se pueblen niveles superiores al de Fermi, a expensas de niveles

inferiores que se despueblan. En realidad, la distribución de los electrones en la banda es compleja y dependiente de la temperatura. En virtud de su propia energía térmica, o por la acción de un gradiente de potencial eléctrico, los electrones de los últimos niveles ocupados pueden acceder a niveles de energía superiores dando lugar a la característica conductividad eléctrica de los metales.

Un sólido, metálico o no, (el modelo de bandas es aplicable a cualquier tipo de sólido) puede tener un sistema de bandas muy complicado. De todas maneras dos de ellas son especialmente importantes: La última banda total o parcialmente llena con electrones y la primera vacía. Generalmente, a una banda totalmente llena con electrones se le da el nombre de **banda de valencia** y a una parcialmente llena se le da el de **banda de conducción**. La posición relativa de ambas bandas determina el tipo de propiedades eléctricas del sólido en cuestión.

La determinación del sistema de bandas en un sólido es difícil y matemáticamente compleja. No pueden utilizarse aproximaciones cualitativas eficaces como en el modelo de orbitales moleculares para sistemas más simples. Sin embargo, es posible hablar de las propiedades de las bandas de valencia y de conducción aún sin precisar su origen y forma de generarse.

Metales

Un sólido será un metal si la última banda que contiene electrones está semillena (caso de los elementos del Grupo 1, los alcalinos) o, si a pesar de estar completamente llena (como en los elementos del Grupo 2), la primera banda vacía se superpone en cierta extensión con aquella. El carácter metálico y la conductividad de los elementos del Grupo 11, Cu, Ag y Au se explica de la misma manera.

La conductividad eléctrica de un metal disminuye con la temperatura. Este hecho parece contradictorio puesto que al aumentar la temperatura también aumenta la movilidad de los electrones. Sin embargo, hay que tener en cuenta otro hecho. En su movimiento a través del cristal, los electrones se desplazan a través de la red periódica de núcleos, siendo atraídos sucesivamente por ellos. Al aumentar la temperatura, la red cristalina vibra cada vez con mayor intensidad y, en ciertos momentos, puede ser destruida o modificada temporalmente, lo cual no beneficia en absoluto al mecanismo de conducción.

Semimetales

En los semimetales, el límite inferior de la primera banda vacía de electrones se encuentra ligeramente por debajo del límite superior de la última banda totalmente llena de electrones (existe una ligerísima superposición). Incluso a 0 K, la banda superior está algo poblada, al tiempo que la banda inferior está algo vacía. Sus propiedades metálicas son muy inferiores a las de los metales. El arsénico (As), antimonio (Sb) y bismuto (Bi) del grupo 15 son semimetales.

Semiconductores

En estos sólidos, no se produce superposición entre la última banda completamente llena de electrones y la primera vacía. Entre ambas bandas existe una zona de energías prohibidas para los electrones (**banda prohibida**). La separación entre ambas bandas, o

lo que es lo mismo, la amplitud de la banda prohibida, es suficientemente pequeña para que a temperaturas superiores a 0 K (dependiendo del material en particular), la propia energía térmica de los electrones sea suficiente para que los electrones más energéticos de la banda de valencia (llena a 0 K) puedan pasar a la de conducción (vacía a 0K). En el cero absoluto, los electrones están distribuidos de forma totalmente ordenada: es decir, la banda de valencia está completamente llena y la de conducción totalmente vacía.

A temperaturas superiores al 0 K, existen suficientes electrones en la banda de conducción (y correspondiente el mismo número de "huecos" en la banda de valencia) para que estos materiales sean conductores. La conductividad de un semiconductor aumenta con la temperatura, a la inversa de lo que sucede en los metales.

El factor dominante que explica este comportamiento es que el número de portadores de carga (electrones en la banda de conducción y ¡huecos positivos! en la de valencia) aumenta con la temperatura y, con ella, la conductividad.

El germanio (Ge) es un semiconductor típico ampliamente utilizado en la industria electrónica. La amplitud de la banda prohibida en este elemento es de apenas 0.66 eV.

Los semiconductores pueden mezclarse con pequeñas cantidades de impurezas (**dopado**) para aumentar el número de electrones en la banda de conducción (por ejemplo, As) o con impurezas que aporten menos electrones a la capa de valencia (aumentando los huecos en la misma, por ejemplo, Ga). De esta forma se mejoran y varían sus propiedades eléctricas: son los denominados semiconductores extrínsecos.

Aislantes

Si la separación energética entre la banda de valencia y la de conducción (amplitud de la banda prohibida) es suficientemente grande para que, a temperaturas razonables, la energía térmica de los electrones no sea suficiente para que pasen a niveles superiores, se tiene un aislante. El diamante es un aislante típico. La amplitud de su banda prohibida es considerable: de 5.47 eV. Los aislantes no conducen la corriente eléctrica. Muchos materiales cerámicos son aislantes y ésta es una de sus propiedades más importantes.

El silicio es otro aislante (la amplitud de su banda prohibida es de 1.12 eV). Sin embargo, el silicio puede doparse con impurezas donadoras de electrones para obtener un material semiconductor extrínseco.

Interacciones descritas con modelos electrostáticos clásicos

En los fragmentos "2 a 2" del enlace covalente típico, debido al Principio de Incertidumbre, el par de electrones ocupa una región inmensamente grande. Por ejemplo, en la molécula de hidrógeno, si los núcleos tuvieran un radio de un centímetro, la distancia entre ellos sería de... ¡700 metros! y se encontrarían inmersos en el dominio (negativo) de un par de electrones. Vale la pena recordar que, sin la presencia de los dos núcleos positivos, sería imposible tener a los dos electrones en una misma zona en el espacio. Dado que ambos son negativos, se repelerían y saldrían disparados hasta una distancia enorme. Lo mismo es cierto para los núcleos de hidrógeno. Si no fuera por la presencia de los electrones, los núcleos saldrían disparados en direcciones opuestas hacia el infinito. es decir, los núcleos mantienen unidos a los electrones y los electrones

mantienen unidos a los núcleos. Mejor dicho, la interacción eléctrica de los 2 núcleos y los 2 electrones (éstos deslocalizados en un inmenso dominio espacial) los mantiene unidos a los cuatro. Es un caso en el que las atracciones son de mayor magnitud que las repulsiones.

Cuando ambos núcleos son idénticos (un enlace homonuclear) la atracción que ejercen los respectivos *cores* sobre el dominio electrónico es idéntica también. En estas condiciones, el dominio electrónico se distribuye simétricamente alrededor de ambos *cores*.

Sin embargo, si los núcleos son diferentes (enlace heteronuclear), la atracción que los *cores correspondientes* ejercen sobre el dominio del par electrónico no puede ser la misma. Uno de los dos *cores* atrae más al dominio electrónico.

En estas circunstancias, el dominio electrónico se distribuye asimétricamente. Se distorsiona hacia el *core* que es más capaz de atraer el dominio electrónico hacia sí. Se dice que el elemento cuyo *core* es atraído más el dominio electrónico hacia sí es más *electronegativo* que el otro.

Como resultado de la distribución asimétrica del dominio electrónico, aparecen polos eléctricos en el fragmento "2 a 2". De un lado -donde se encuentra el elemento más electronegativo- se acumula un exceso de carga negativa. Y del otro -donde está el elemento menos electronegativo-, un defecto de carga negativa. Por ejemplo, en el cloruro de hidrógeno, HCl, del lado del cloro hay una carga fraccionaria de -0.17 mientras que del lado del hidrógeno hay una carga de -obviamente- +0.17.

El hecho de que algunas moléculas presenten polos eléctricos (se dice que son moléculas polares) hace que las moléculas vecinas se atraigan entre sí.

Evidentemente, la mecánica cuántica es capaz de describir adecuadamente las interacciones entre moléculas. Sin embargo, no es necesario. También la física clásica es capaz de hacerlo.

Desde hace mucho, los físicos han estudiado ciertos sistemas que ellos han llamado *dipolos eléctricos* (dos cargas puntuales de signo opuesto a una cierta distancia). El resultado más importante es que la interacción entre varios dipolos eléctricos siempre es atractiva. Es decir, otro caso en el que la magnitud de las atracciones (entre cargas opuestas) supera a las repulsiones (entre cargas iguales).

Así, las complejas moléculas de agua, de acetona y hasta de sacarosa, con todos sus protones y con todos sus electrones y con la distribución que propone la mecánica cuántica, se pueden modelar simplemente como 2 puntos con cargas de signos opuestos separados por una cierta distancia.

Increíblemente, los resultados de esta gruesísima aproximación son extraordinariamente buenos. Como se verá un poco más adelante, se puede predecir que sustancias se disuelven en cuáles otras, por ejemplo. Cuál sería el estado físico (o de agregación) de cualquier sustancia en las condiciones de presión y temperatura que imperan en la superficie terrestre. E incluso, cómo empezaría la reacción química entre cualesquiera dos sustancias que se pongan en contacto.

Como en el caso de las interacciones entre moléculas, la mecánica cuántica sería perfectamente capaz de describir las interacciones en las que participan iones. Sin embargo, tampoco es necesario. Los iones se pueden modelar simplemente como puntos con carga. Es decir, se puede hacer caso omiso de su estructura interna núcleo-electrónica (ésta sí, que sólo puede ser descrita adecuadamente mediante la mecánica cuántica) y considerarlos, en una primer instancia, sencillamente como puntos con carga. Curiosamente este modelo también da resultados extraordinariamente buenos.

Interacciones iónicas (en las que participan iones)

Ion-ion

Básicamente, las interacciones que ocurren en una red iónica se explican como las posibles interacciones entre un número muy grande de cargas. El resultado de dicha interacción otra vez da una estructura donde las atracciones entre iones con cargas opuestas predominan sobre las repulsiones entre iones de la misma carga.

Por ejemplo, en la estructura del cloruro de sodio, cada Na^+ está rodeado por 6 cloruros, Cl^- , y cada cloruro por 6 Na^+ . Para ambos, los vecinos más cercanos con carga del mismo signo se encuentran en una diagonal —de mayor distancia que la que existe entre iones con carga de signos opuestos.

Este tipo de interacción es muy fuerte y de gran alcance.

Ion-dipolo

Las sustancias que consisten de moléculas polares son capaces de disolver a muchas sustancias iónicas (cloruro de sodio en agua, por ejemplo). Modelando a los iones como cargas puntuales y a las moléculas polares como dipolos eléctricos se puede describir las interacciones que ocurren en una disolución iónica. Si la atracción resultante de las interacciones ion-dipolo es mayor que la de las interacciones ion-ion, la red iónica se deshace y la sustancia iónica se disuelve en la sustancia molecular polar. En la disolución, cada ion se encuentra interactuando con cientos o miles de moléculas del disolvente. Se dice que los iones se encuentran *solvatados*. Este proceso da cuenta, otra vez, de una mezcla a escala molecular, razón por la cual la disolución formada la percibimos como un material de aspecto homogéneo.

Como se ve, los iones (partículas que no serían estables en forma aislada) se pueden estabilizar de 2 maneras: interactuando con un inmenso número de iones en una estructura reticular o interactuando con un inmenso número de moléculas polares en una disolución iónica.

Las disoluciones iónicas o salinas son materiales muy especiales en las que las partículas solvatadas no serían estables en forma aislada. El propio proceso de disolución destruye la estructura reticular de la sustancia original. En cambio, en las disoluciones de sustancias moleculares, las partículas solvatadas (las moléculas) sí pueden ser estables en forma aislada.

Interacciones dipolares o de Van der Waals

Dipolo permanente-dipolo permanente o *polar-polar*

Las moléculas de muchas sustancias son polares, es decir, poseen un dipolo permanente debido a la distribución asimétrica del dominio de un par electrónico en uno o varios de sus enlaces. La magnitud y el alcance de este tipo de interacción, aunque menor a las encontradas en las interacciones iónicas, son todavía considerables. El agua, a pesar de su pequeña masa molar, es líquida debido a la fuerte interacción dipolar entre sus moléculas. Además, este modelo sirve para explicar la conocida regla empírica de *lo similar disuelve a lo similar*.

La acetona, el etanol y la sacarosa —por poner algunos ejemplos— se disuelven en agua porque son sustancias que consisten de moléculas polares. Es la atracción entre los correspondientes dipolos permanentes lo que explica que estas sustancias se mezclen a escala molecular y que la disolución formada la percibamos macroscópicamente como un material de aspecto homogéneo.

Dipolo permanente-dipolo inducido o *polar-no polar*

Moléculas con un dipolo permanente (es decir, moléculas polares) pueden inducir un dipolo en moléculas vecinas no polares. Aunque la solubilidad del oxígeno en agua es muy baja, no es totalmente nula. La poca cantidad de oxígeno que se disuelve en agua ocurre las moléculas polares de agua inducen la formación de un dipolo en las moléculas *no polares* de oxígeno. Este tipo de interacción es menos fuerte y de menor alcance que las *polar-polar*.

Dipolo instantáneo-dipolo inducido o *no polar-no polar*

Inclusive las moléculas no polares se atraen entre sí. Claro que lo hacen muy débilmente y requieren estar muy cerca para poderlo hacer. Si las moléculas no-polares no se atrajeran entre sí, serían gaseosas a cualesquiera temperatura y presión. No es así. La gasolina es líquida y la parafina sólida. A la temperatura y presión imperantes en la superficie terrestre, las moléculas de estas sustancias están tan cerca entre sí y se mueven tan lentamente que caen dentro del alcance de las debilísimas interacciones *no polar-no polar*.

Estas interacciones ocurren así: los dominios electrónicos no son estáticos (los electrones se están moviendo dentro de ellos), se mueven alrededor de una cierta posición promedio. Momentáneamente, se distorsionan un poco respecto de su forma más estable. Esas pequeñas distorsiones dan lugar a pequeñas polarizaciones de la carga, es decir a pequeños dipolos instantáneos. Mientras duran, estos dipolos instantáneos alcanzan a inducir la formación un dipolo en las moléculas vecinas si es que éstas se encuentran lo suficientemente cerca.

Obviamente, este tipo de interacciones son las más débiles y las de menor alcance. Sin embargo, dado que a mayor área molecular es mayor el número de dipolos instantáneos que se forman, este tipo de interacciones se vuelve más importante para moléculas cada vez más grandes.

APÉNDICE 2. Polímeros

La palabra polímero se deriva de las palabras griegas “*polis*” y “*meros*” que significa “*muchos*” y “*partes*” respectivamente y se refiere a una gran molécula constituida por la repetición de pequeñas unidades químicas y de peso molecular bajo, en algunos casos la repetición es lineal de forma semejante a una cadena y en otros las cadenas son ramificadas o interconectadas formando redes tridimensionales. Un polímetro frecuentemente no posee moléculas individuales todas del mismo peso molecular, y no es necesario que tengan todas la misma composición química y la misma estructura molecular.

Existen polímeros naturales y de gran valor comercial como el algodón, formado por fibras de celulosa, la seda que es de una poliamida semejante al nylon y a la lana, el hule proviene del árbol de hevea y del arbusto del guayule, entre otros. Sin embargo, la mayor parte de los polímeros que usamos en nuestra vida diaria son materiales sintéticos con propiedades y aplicaciones variadas.

El estudio de las propiedades de los polímeros comenzó gradualmente y lo que los distingue de los materiales que les dieron origen son sus propiedades fisicoquímicas. En general, los polímeros tienen una excelente resistencia mecánica debido a que las grandes cadenas poliméricas se atraen. Las fuerzas de atracción intermoleculares dependen de la composición química del polímero y pueden ser de varias clases. Las fuerzas que se encuentran en la naturaleza se clasifican habitualmente en fuerzas primarias (interacciones mayores a 50 kcal/mol. Entre éstas se encuentran las uniones iónicas y covalentes) y fuerzas secundarias (interacciones inferiores a 10 kcal/mol). Las fuerzas intermoleculares determinan el estado de agregación del sistema bajo condiciones dadas de presión y temperatura; así como sus propiedades físicas tales como, volatilidad, viscosidad, tensión superficial, miscibilidad y solubilidad.

Por un lado, las fuerzas inductivas aparecen al poner en contacto dos tipos de moléculas, el primer tipo con un dipolo permanente, induciendo un momento dipolo en el segundo tipo de moléculas, produciendo así un desplazamiento nuclear y electrónico, el cual se conoce como polarizabilidad de la molécula.

Por otro lado, se encuentran las fuerzas de Van der Waals, también llamadas fuerzas de dispersión, presentes en las moléculas de muy baja polaridad, generalmente hidrocarburos. Son fuerzas que provienen de dipolos transitorios, como resultado de los movimientos de electrones, por lo que, en cierto instante, una porción de la molécula se vuelve ligeramente negativa, mientras que en otra región, aparece una carga positiva equivalente, formando dipolos no-permanentes. Estos dipolos producen atracciones electroestáticas muy débiles en las moléculas de tamaño normal, pero en los polímeros, formados por miles de estas pequeñas moléculas, las fuerzas de atracción se multiplican y llegan a ser enormes.

Algunos polímeros naturales y muchos de los polímeros sintéticos son homopolímeros, esto es, polímeros obtenidos de un solo tipo de monómeros, por ejemplo el polietileno, el PVC o el polipropileno. Sin embargo, existe un gran número de polímeros que contienen unidades de repetición de más de una unidad química estructural, a los cuales se les llama copolímeros.

Estas combinaciones de monómeros se realizan para modificar las propiedades de los polímeros y lograr nuevas aplicaciones, Lo que se busca es que cada monómero imparta sus propiedades particulares al material final. Por ejemplo, en el terpolímero acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), el acrilonitrilo aporta su resistencia química, el butadieno su flexibilidad y el estireno imparte al material la rigidez que requiera la aplicación particular. Evidentemente al variar las proporciones de los monómeros, las propiedades de los copolímeros van cambiando, de manera que el proceso de copolimerización permite hasta cierto punto fabricar polímeros a la medida. Además no solo se modifican las propiedades al variar su posición dentro de las cadenas. Las mezclas físicas de los primeros, que no llevan una unión permanente entre ellos, también contribuyen a la enorme versatilidad de los materiales poliméricos. Son el equivalente a las aleaciones metálicas. En ocasiones se mezclan para mejorar alguna propiedad, aunque generalmente a expensas de otras. Sin embargo, en muchos casos hay un efecto sinérgico, en el sentido que las propiedades son mejores que las de cualquiera de los polímeros originales. Esto no es frecuente, puede ocurrir únicamente cuando exista perfecta compatibilidad en los polímeros y por regla general no la hay, así que en la mayoría de los casos debe agregarse un ingrediente más para compatibilizar la mezcla. Para lograr esto último casi siempre se emplea un copolímero injertado, o uno de bloque que contenga unidades estructurales de los polímeros que constituyen la mezcla. Otras veces se mezclan simplemente para reducir el costo del material. En otros casos, pequeñas cantidades de un polímero de alta calidad puede mejorar la del otro, al grado de permitir una nueva aplicación.

Cuando se compara la estructura de los polímeros con cualquier otro material se encuentra que el vidrio o los metales presentan una estructura más compacta, esto permite que presenten mayor resistencia mecánica, pero también se convierten en materiales frágiles y difíciles de moldear. La diferencia radica en que los plásticos presentan una estructura molecular, mientras que los metales y el vidrio presentan una estructura atómica. Por esta razón los polímeros presentan una resistencia mecánica relativamente menor, un módulo de elasticidad menor y dependencia de las propiedades mecánicas con respecto al tiempo.

APÉNDICE 3. Cerámicas

Las arcillas, desde el punto de vista geológico, son minerales naturales, filosilicatos en su mayor parte, que se formaron hace varios millones de años y cuyas propiedades físico-químicas dependen de su estructura y de su tamaño de grano muy fino (inferior a $2 \mu\text{m}$). Se define como cualquier sedimento o depósito mineral que es plástico cuando se humedece y que consiste en un material granuloso muy fino, formado por partículas muy pequeñas.

Desde el punto de vista económico, las arcillas son un grupo de materiales industriales con diferentes características mineralógicas y genéticas; y con distintas propiedades tecnológicas y aplicaciones. Las arcillas son constituyentes esenciales de gran parte del suelo y de los sedimentos debido a que son, en su mayor parte, productos finales de la hidrólisis de las cenizas volcánicas.

Se han incorporado arcillas en numerosos productos de uso cotidiano a través de nuevas tecnologías. Un ejemplo, son los nuevos materiales poliméricos que incluyen en su composición arcillas con el fin de lograr superficies suaves al contacto y mejores propiedades mecánicas, como en los juguetes, en las partes de automóviles y en otros componentes que son, además, resistentes al fuego y al desgaste.

Las arcillas, al igual que el resto de los filosilicatos, presentan una estructura basada en el apilamiento de planos. Los átomos de silicio se unen a cuatro átomos de oxígeno formando un tetraedro, cada átomo de silicio tiene cuatro cargas eléctricas positivas, mientras que cada átomo de oxígeno tiene dos cargas negativas, por tanto las esquinas del tetraedro todavía tienen una carga negativa para enlazarse a otro átomo con carga positiva, abriendo la posibilidad de que se forme una cadena de tetraedros. Los grupos tetraédricos(SiO_4)

APÉNDICE 4. Carbono

Como todos los elementos que conforman la materia del Universo, el carbono se originó en las estrellas, mediante reacciones de fusión nuclear. El carbono es un elemento relativamente abundante en nuestro planeta; sus átomos se encuentran casi en su totalidad combinados con otros elementos, formando una gigantesca variedad de compuestos. Se piensa que la primera forma en que existió el carbono en nuestro planeta fue como dióxido de carbono (CO_2) que pudo haberse fijado en la corteza terrestre de diversas maneras, por ejemplo al combinarse con algunos óxidos metálicos, formando carbonatos como el mármol, (CaCO_3).

Se piensa que el carbono elemental se originó en el planeta como resultado de la sedimentación de enormes cantidades de plantas bajo el agua, que fueron descomponiéndose por la acción de diversos microorganismos en un ambiente escaso en oxígeno.

Formas cristalinas

Parte de ese carbono “primitivo”, originado por los bosques de hace más de 300 millones de años, opaco, ligero y quebradizo, semejante al que se utiliza en un asador, cristalizó creando otras formas de carbono, con distintos grados de dureza. Esto ocurrió gracias a las enormes variaciones en la presión y temperatura de la Tierra durante los terremotos y las erupciones volcánicas.

La dureza de un material se determina por la capacidad que tiene éste de rayar a otros, y se mide en una escala arbitraria llamada Mohs, por el mineralogista alemán que la inventó. La escala de Mohs va del 1 al 10; el valor máximo de 10 corresponde al diamante, que no puede ser rayado por ningún otro material de origen natural, mientras que el uno corresponde al talco. La palabra diamante hace honor a esta característica pues proviene del griego *adamantos*, que significa invencible. Sin embargo, los preciados diamantes no son más que átomos de carbono que forman una estructura tetraédrica: a cada átomo se unen otros cuatro átomos y el resultado es una red tridimensional extraordinariamente rígida, la cual da al diamante su dureza. Cuando los átomos de carbono se acomodan en este arreglo cristalino, es el elemento puro más caro que existe, debido principalmente a su belleza. Sin embargo, su precio no está sujeto a controles internacionales (lo que sí ocurre con el oro), ya que éste puede variar enormemente de un diamante a otro del mismo peso (un “quilate” equivale a 0.2 g.). Son muy importantes su brillo y su calor, determinados por las pequeñas cantidades de impurezas que contengan.

Si en lugar de estar acomodados tetraédricamente, los átomos de carbono se disponen en el espacio de manera diferente unos con respecto a otros, este material pierde toda su fuerza y belleza. El grafito es otra forma cristalina de carbono, en la que los átomos se encuentran en los vértices de hexágonos que tapizan un plano, de modo que cada átomo se encuentra unido a otros tres, como si fuera un piso formado de azulejos hexagonales; paralelo a cada plano de hexágonos, se encuentra otro idéntico. La distancia entre planos de hexágonos es grande, más del doble de la distancia entre dos átomos de carbono vecinos en un hexágono. Así, las interacciones entre planos adyacentes de átomos de

carbono son muy débiles, por lo que se dice que la estructura del grafito es bidimensional.

El grafito es completamente distinto al diamante: negro, opaco y blando. Tan blando que en la escala de Mohs alcanza apenas 0.5. Con una ligerísima presión, los planos de átomos de carbono se deslizan unos sobre otros, por eso al contacto con nuestros dedos queda una mancha negra sobre ellos. Gracias a esta propiedad es que podemos usar el grafito para escribir, dentro de nuestros lápices o lapiceros; al presionar sobre el papel, depositamos sobre éste capas de átomos de carbono. De hecho la palabra grafito proviene precisamente del latín *graphein*, que significa escritura, ya que desde tiempos muy remotos se utiliza para escribir.

El diamante y el grafito son lo que se conoce como alótropos, es decir, la distinta formas físicas en las que puede existir un elemento, ya sea en el arreglo tridimensional de sus átomos o en el número de átomos que forman sus moléculas. Las diferentes formas alotrópicas de un elemento tienen, en general, diferentes propiedades físicas y químicas. Entre los elementos que tienen formas alotrópicas se encuentran además del carbono, el oxígeno (O_2 , oxígeno diatómico y O_3 , ozono), el fósforo (rojo, blanco, negro) y el estaño (blanco, gris).

Además de las formas cristalinas, existe el carbono amorfo, o simple carbón, en que los átomos se encuentran "desordenados". Por su abundancia, esta forma es la que se ha usado como combustible desde la prehistoria. Hoy en día, aproximadamente el 25% de la energía que se produce en el mundo proviene de quemar carbón, principalmente en las plantas termoeléctricas; las reservas de carbón son más del doble de las del petróleo y casi el triple de las del gas natural. También es posible obtener grafito a partir de carbono amorfo, calentándolo a $2500\text{ }^\circ\text{C}$ en presencia de sílice (SiO_2) y en ausencia de oxígeno.

Los fullerenos

Mientras en su forma alotrópica amorfa el carbono es posiblemente la sustancia elemental más antigua reconocida por el hombre, existen otros alótropos descubiertos apenas hace 15 años, cuando ya se pensaba que el carbono no daría más sorpresas. En 1985 los investigadores Harold Kroto, británico, y Richard Smalley, estadounidense, encontraron que al bombardear grafito con un láser a temperaturas por encima de los $10,000\text{ }^\circ\text{C}$, se formaban moléculas integradas por un alto número de átomos de carbono, desde 44 hasta 90, con un marcado de predominio de las de 60 átomos (C_{60}) y las de 70 en segundo lugar. Estos investigadores conjeturaron que la mayor estabilidad del C_{60} se debía a que formaba un poliedro "pseudoesférico" de 60 vértices, con caras hexagonales y pentagonales, muy semejante a la figura de un balón de fútbol. A estas formas cristalinas se les ha llamado fullerenos, en honor al celebre arquitecto R. Buckminster Fuller, diseñador de domos geodésicos.

En la búsqueda de posibles aplicaciones de este fascinante material, destaca lo realizado en el campo de la medicina. Se ha probado que un derivado soluble en agua del C_{60} inhibe a los virus de inmunodeficiencia humana VIH-1 y VIH-2, causantes del sida.

Mediante estudios de simulación por computadora se ha visto que una molécula de C_{60} puede acomodarse perfectamente en el sitio activo de ciertas enzimas vitales para el virus (el sitio activo es la parte de la molécula de la enzima donde se lleva a cabo la reacción para la cual la enzima es un catalizador), lo que podría explicar el mecanismo de inhibición del virus. Desafortunadamente, la potencia de estos fullerenos es muy baja comparada con la de los fármacos empleados hoy en día contra el VIH.

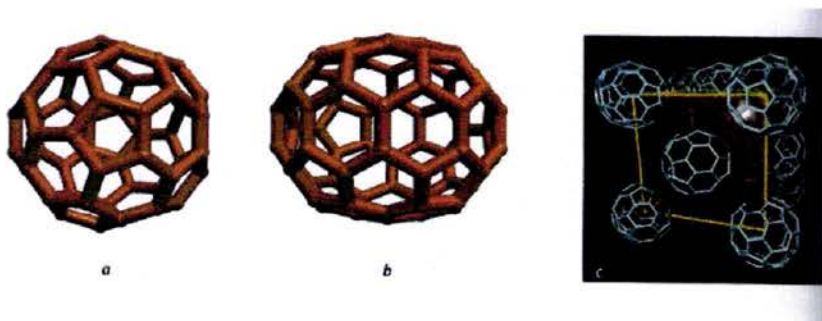


Figura A3. a) C_{60} , o Buckminsterfullereno; b) C_{70} ; c) Cristal cúbico centrado en las caras formado por moléculas de C_{60} .

APÉNDICE 5. Silicio

El silicio, de símbolo Si, es un elemento semimetálico, el segundo elemento más común en la Tierra después del oxígeno. Su número atómico es 14 y pertenece al grupo 14 de la tabla periódica. Fue aislado por primera vez de sus compuestos en 1823 por el químico sueco Jöns Jakob Berzelius.

Propiedades y estado natural

Se prepara en forma de polvo amorfo amarillo pardo o de cristales negros-grisáceos. Se obtiene calentando sílice, o dióxido de silicio (SiO_2), con un agente reductor, como carbono o magnesio, en un horno eléctrico. El silicio cristalino tiene una dureza de 7, suficiente para rayar el vidrio, de dureza de 5 a 7. El silicio tiene un punto de fusión de $1,410\text{ }^\circ\text{C}$, un punto de ebullición de $2,355\text{ }^\circ\text{C}$ y una densidad relativa de 2.33. Su masa molar es $28,086\text{ g/mol}$.

Se disuelve en ácido fluorhídrico formando el gas tetrafluoruro de silicio, SiF_4 (), y es atacado por los ácidos nítrico, clorhídrico y sulfúrico, aunque el dióxido de silicio formado inhibe la reacción. También se disuelve en hidróxido de sodio, formando silicato de sodio y gas hidrógeno. A temperaturas ordinarias el silicio no es atacado por el aire, pero a temperaturas elevadas reacciona con el oxígeno formando una capa de sílice que impide que continúe la reacción. A altas temperaturas reacciona también con nitrógeno y cloro formando nitruro de silicio y cloruro de silicio respectivamente.

El silicio constituye un 28 % de la corteza terrestre. No existe en estado libre, sino que se encuentra en forma de dióxido de silicio y de silicatos complejos. Los minerales que contienen silicio constituyen cerca del 40 % de todos los minerales comunes, incluyendo más del 90 % de los minerales que forman rocas volcánicas. El mineral cuarzo, sus variedades (cornalina, crisoprasa, ónice, pedernal y jasper) y los minerales cristobalita y tridimita son las formas cristalinas del silicio existentes en la naturaleza. El dióxido de silicio es el componente principal de la arena. Los silicatos (en concreto los de aluminio, calcio y magnesio) son los componentes principales de las arcillas, el suelo y las rocas, en forma de feldespatos, anfíboles, piroxenos, micas y ceolitas, y de piedras semipreciosas como el olivino, granate, zircón, topacio y turmalina.

El silicio es un elemento muy abundante en las arenas de nuestro planeta, ha sido el principal protagonista de la revolución electrónica del siglo XX: es el componente fundamental de los transistores y chips de las computadoras y al parecer también tendrá un importante papel en la nanotecnología. Fue una sorpresa descubrir que, como nanoestructura, el silicio poroso es luminiscente, lo que abre nuevas posibilidades de aplicación de este material en el campo de la óptica.

Aplicaciones

Se utiliza en la industria del acero como componente de las aleaciones de silicio-acero. Para fabricar el acero, se "desoxida" el acero fundido añadiéndole pequeñas cantidades de silicio; el acero común contiene menos de un 0,03% de silicio. El acero de silicio, que contiene de 2.5 a 4 % de silicio, se usa para fabricar los núcleos de los transformadores eléctricos, pues la aleación presenta baja histéresis.

Existe una aleación de acero, el durirón, que contiene un 15 % de silicio y es dura, frágil y resistente a la corrosión; el durirón se usa en los equipos industriales que están en contacto con productos químicos corrosivos. El silicio se utiliza también en las aleaciones de cobre, como el bronce y el latón.

El silicio es un semiconductor; su resistividad a la corriente eléctrica a temperatura ambiente varía entre la de los metales y la de los aislantes. La conductividad del silicio se puede controlar añadiendo pequeñas cantidades de impurezas llamadas dopantes. La capacidad de controlar las propiedades eléctricas del silicio y su abundancia en la naturaleza han posibilitado el desarrollo y aplicación de los transistores y circuitos integrados que se utilizan en la industria electrónica.

La sílice y los silicatos se utilizan en la fabricación de vidrio, barnices, esmaltes, cemento y porcelana, y tienen importantes aplicaciones individuales. La sílice fundida, que es un vidrio que se obtiene fundiendo cuarzo o hidrolizando tetracloruro de silicio, se caracteriza por un bajo coeficiente de dilatación y una alta resistencia a la mayoría de los productos químicos. El gel de sílice es una sustancia incolora, porosa y amorfa; se prepara eliminando parte del agua de un precipitado gelatinoso de ácido silícico, $\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, el cual se obtiene añadiendo ácido clorhídrico a una disolución de silicato de sodio. El gel de sílice absorbe agua y otras sustancias y se usa como agente desecante y decolorante.

El silicato de sodio (Na_2SiO_3), también llamado vidrio, es un silicato sintético importante, sólido amorfo, incoloro y soluble en agua, que funde a $1,088^\circ\text{C}$. Se obtiene haciendo reaccionar sílice (arena) y carbonato de sodio a alta temperatura, o calentando arena con hidróxido de sodio concentrado a alta presión. La disolución acuosa de silicato de sodio se utiliza para conservar huevos; como sustituto de la cola o pegamento para hacer cajas y otros contenedores; para unir gemas artificiales; como agente incombustible, y como relleno y adherente en jabones y limpiadores. Otro compuesto de silicio importante es el carborundo, un compuesto de silicio y carbono que se utiliza como abrasivo.

El monóxido de silicio, SiO , se usa para proteger materiales, recubriéndolos de forma que la superficie exterior se oxida al dióxido, SiO_2 . Estas capas se aplican también a los filtros de interferencias.

Al término de este trabajo logre comprender que todos los avances científicos y tecnológicos que se han dado en los últimos 30 años, son fruto de la NANOTECNOLOGIA.

VI. BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- _ Gourley, P., "Nanoláseres". *Investigación y ciencia* **1998**, (260), 22-27
- _ Reed, M., Tour, J. "Computación molecular". *Investigación y ciencia* **2000**, (287), 56-63
- _ Collins, P., Avouris, P. "Introducción de los nanotubos en el dominio de la electrónica". *Investigación y ciencia*, **2001**, (293), 12-20
- _ Gibas, W. "Células cibernéticas" *Investigación y ciencia* **2001**, (301), 45-49
- _ Stix, G., "Nanotécnica, la nueva ingeniería". *Investigación y ciencia* **2001**, (302), 30-35
- _ Whitesides, G., Love, C. "Nanotécnica y sus procesos de fabricación". *Investigación y ciencia* **2001**, (302), 37-41
- _ Roukes, M., "Leyes nanoescales". *Investigación y ciencia* **2001**, (302), 46-53
- _ Lieber, C., "Nanocircuitos". *Investigación y ciencia* **2001**, (302), 55-60
- _ Alivisatos, P., "Nanotécnica en medicina". *Investigación y ciencia* **2001**, (302), 63-69
- _ Drexler, E., "Nanotécnica y ensambladores". *Investigación y ciencia* **2001**, (302), 70-71
- _ Smalley, R., "Nanotécnica y química". *Investigación y ciencia* **2001**, (302), 72-73
- _ Whitesides, G., "Máquinas nanométricas antiguas y futuras". *Investigación y ciencia* **2003**, (302), 74-79
- _ Ashley, S., "De la microtécnica a la nanotécnica". *Investigación y ciencia* **2001**, (302), 80-81
- _ Yakobson, B., Smalley, R., "Materiales para el tercer milenio". *Mundo científico* **1998**, (190), 34-40
- _ Alcalde, J., "Nanotecnología, una revolución en nuestras manos". *Muy interesante* **2002**, (6), 20
- _ Alonso, A., "Nanorrobots al ataque". *Muy interesante* **2002**, (3), 22-26
- _ Mendoza, D., "Nanomateriales: nuevas propiedades a menores dimensiones". *Ciencia* **2003**, (54), 23-29
- _ Terrones, M., "La nanotecnología del carbono". *Ciencia* **2003**, (54), 30-39
- _ Terrones, H., "Nanoestructuras con curvatura: el mundo de nuevas posibilidades"

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Ciencia **2003**, (54), 40-52

- Espinoza, F. J., González, J., "Nuevos materiales superduros". *Avance y Perspectiva* **2002**, (21), 347-353
- Tagüeña, J., Del Río, A. "Nanomundo. La importancia de lo pequeño". *¿Cómoves?* **2003**, (50), 10.
- Castellanos, M., "Nanotecnología: la última revolución industrial". *Educación Química* **2003**, (14), 207-219