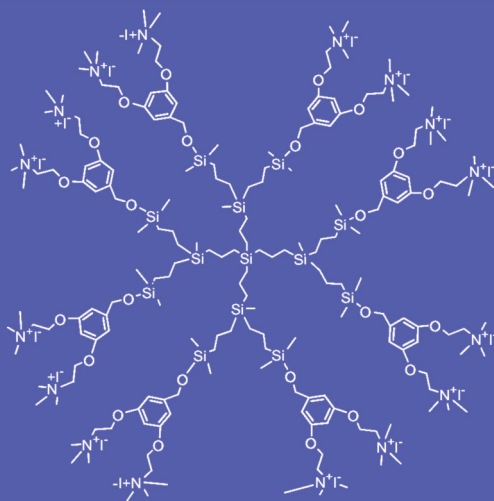


# 27

## CLAVES PARA EL NANOMUNDO

ANDRÉ-YVES PORTNOFF



FUNDACIÓN COTEC PARA LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA

DOCUMENTOS COTEC SOBRE OPORTUNIDADES TECNOLÓGICAS





27

CLAVES PARA EL  
NANOMUNDO

ANDRÉ-YVES PORTNOFF



27

CLAVES PARA EL  
NANOMUNDO

ANDRÉ-YVES PORTNOFF

Título de la obra original:  
Clefs pour le nanomonde

Título de la obra en inglés:  
Keys to the Nanoworld

Autor: André-Yves Portnoff

Editada por:  
© Futuribles, juillet 2008  
47 rue de Babylone  
75007 Paris, France

Traducida al español por:  
María Dolores Vázquez Navarro

© de la edición española:  
Fundación Cotec para la innovación tecnológica

ISBN: 978-84-92933-07-5  
Depósito Legal: M-7973-2011

Imprime:  
Gráficas Arias Montano

# ÍNDICE

|   |    |
|---|----|
| <b>Presentación</b> .....   | 9  |
| <b>Introducción</b> .....   | 11 |
| No entramos en el nanomundo .....                                     | 11 |
| Antiguo y moderno .....   | 11 |
| <b>1. Rupturas y continuidad</b> .....                                | 17 |
| Nanotecnologías: una continuidad milenaria... .....                   | 17 |
| ...da lugar a verdaderas rupturas .....                               | 18 |
| Cuadro: Las sorpresas de la física cuántica .....                     | 19 |
| Cuadro: ¿Es la microelectrónica ya una nano-<br>ciencia? .....        | 21 |
| Los primeros balbuceos del enfoque ascendente .                       | 22 |
| Cuando la intuición nos lleva por el camino equi-<br>vocado .....     | 23 |
| <b>2. La gama de nanotecnologías</b> .....                            | 27 |
| Entre el fútbol y el rugby .....                                      | 27 |
| De las antenas de televisión tradicionales a las<br>parábolicas ..... | 30 |
| Hacia una electrónica sin silicio .....                               | 33 |
| La electrónica molecular .....  | 33 |
| De los nanomateriales a los nanoaparatos .....                        | 35 |
| <b>3. Perspectivas prometedoras para la salud</b> .....               | 37 |
| Determinar cuáles son las células enfermas .....                      | 37 |
| Hacia una medicina regenerativa .....                                 | 41 |
| De la imagen médica a los microlaboratorios .....                     | 43 |
| Como una mariposa enamorada .....                                     | 45 |
| <b>4. Una microinformática renovada</b> .....                         | 47 |
| Ordenadores más cómodos .....   | 47 |
| Pantallas de menor consumo .....                                      | 50 |



|  |    |
|--|----|
| <b>5. De la ecología a la vida cotidiana</b> ..... | 53 |
| Energía y ecología .....                           | 53 |
| Producción y almacenamiento de energía .....       | 55 |
| En la vida diaria .....                            | 56 |
| <b>6. Precauciones y acciones</b> .....            | 61 |
| Lo que está en juego y acciones .....              | 65 |

## presentación

La colección de Documentos Cotec sobre Oportunidades Tecnológicas se enmarca dentro del objetivo estratégico de actuar como motor de sensibilización a la actitud innovadora tanto en los ámbitos empresarial y académico como en la sociedad en general.

En esta ocasión la Fundación Cotec ha optado por publicar la traducción de una obra ya existente *Clefs pour le nanomonde*, editada por Futuribles, haciendo así excepción a la tradición metodológica de la colección. Esta metodología se basa en la edición de los documentos después de un proceso de debate en sesiones de identificación de las oportunidades que ofrece una determinada tecnología o un grupo de tecnologías. Futuribles es un centro independiente de origen francés dedicado al estudio y reflexión prospectiva sobre el mundo contemporáneo.

La tecnología a la que se dedica el documento es la nanotecnología y, en el propio título «Claves para el nanomundo», se percibe ya la orientación de la obra a la oportunidad que supone esta tecnología para la transformación de nuestro entorno, aprovechando las innovaciones basadas en ella, en campos tan diversos como, por ejemplo, la salud, la informática o la energía y la ecología.

El autor de la obra, André-Yves Portnoff, doctor en ciencias, dirige la colección bilingüe «Perspectives» en Futuribles, y ha sabido combinar en su análisis del nanomundo

rigor y divulgación, cualidades difíciles de mezclar con éxito. Esta característica dota al estudio de mayor interés frente a lo mucho que hay ya escrito sobre nanotecnología, y es la razón que ha animado a Cotec a no emprender desde cero en esta coyuntura una labor que consideramos ya bien realizada y que responde plenamente a los propósitos de nuestra colección.

Agradecemos a Futuribles las facilidades que nos ha dado para poder publicar este documento, así como a la embajada de Francia en España su intermediación en este asunto. De forma especial agradecemos la calidad de su trabajo a la traductora María Dolores Vázquez Navarro, y queremos dejar constancia también de nuestro agradecimiento al propio autor de la obra original por su colaboración en la supervisión de esta edición en español.

Cotec, 2011

## INTRODUCCIÓN

### NO ENTRAMOS EN EL NANOMUNDO

#### Antiguo y moderno

La isla de Murano, situada a solo algunos kilómetros de Venecia, es más conocida por sus maestros vidrieros que por su papel en las nanotecnologías. Así y todo, es la residencia de uno de los 11 participantes en el programa europeo de vidrios autolimpiables gracias a la deposición de una película nanométrica de óxido de titanio. Hablamos de la SSV (Stazione sperimentale del vetro): el centro italiano de investigación del vidrio. Este encuentro entre las nanotecnologías y más de siete siglos de tradición artesanal es menos sorprendente de lo que puede parecer a primera vista. Murano debe su prestigio histórico no sólo al talento artístico de sus creadores, sino también a su larga contribución a las innovaciones técnicas, como el cristal de Venecia y el «cristal blanco»<sup>1</sup> desarrollados en el siglo xv. Da la casualidad de que los vidrieros y ceramistas han utilizado desde hace mucho tiempo, y sin saberlo, las características especiales de la materia a escala nanométrica (10<sup>9</sup> metros). Como explica Sandro Hreglich del SSV, el vidrio de «rubí» de Venecia, como el cristal de

---

<sup>1</sup> Vidrio blanco opaco que imita a la porcelana.

Bohemia, debe su color a una fina dispersión de partículas nanométricas de oro, mientras que es una dispersión de cristales nanométricos la que confiere su opacidad a los vidrios opalinos creados en el siglo XVII en Murano.

De hecho, a medida que se profundiza más en el tema, se encuentran más utilidades antiguas, pero no conscientes, de las propiedades de la materia a escala nanométrica. Las nanopartículas de plata y oro colorean de amarillo, rojo o azul las vidrieras de las iglesias medievales, en las que el color depende del diámetro de las partículas. Las cerámicas del Renacimiento italiano, así como las de los mayas, también han explotado estas propiedades. En cuanto a los romanos, estos disimulaban sus cabellos blancos aplicándose una pasta de tiza y óxido de plomo. Este procedimiento es poco recomendable, dada la toxicidad del plomo, pero es interesante porque un equipo francés<sup>2</sup> ha explicado hace poco su funcionamiento: el azufre de los cabellos reacciona con el óxido, haciendo crecer nanocristales alineados de sulfuro de plomo que colorean el pelo de negro.

Aún más sorprendente es que, estudiando el acero de un sable de Damasco forjado por el persa Assad en el siglo XVI, unos investigadores han identificado fibras nanométricas de cementita<sup>3</sup> encapsuladas en nanotubos de carbono.<sup>4</sup> Otros investigadores han encontrado nanotubos en hielo de 10.000 años de antigüedad.<sup>5</sup> Estas agrupaciones complejas de átomos de carbono, cuya existencia era desconocida hasta 1991, existen por tanto en la naturaleza.

---

<sup>2</sup> El laboratorio de restauración del Louvre (Philippe Walter), Onera (centro francés de investigación aeroespacial) y la sociedad L'Oréal han juntado sus esfuerzos. Cf. *Nano Letters*, vol. 6, n.º 10, octubre 2006.

<sup>3</sup> Carburo de hierro que contribuye a las propiedades mecánicas de los aceros y hierros colados.

<sup>4</sup> SANDERSON, Katharine, «Sharpest Cut from nanotubo Sword. Carbon Nanotech may Have Given Swords of Damascus their Edge». *Nature*, 15 noviembre 2006.

<sup>5</sup> HERVÉ-BAZIN, Benoît (bajo la dirección de). *Les Nanoparticules. Un enjeu majeur pour la santé au travail*. Paris: EDP Sciences, 2007, p. 300.

En nanotecnia la innovación ha precedido al conocimiento científico de los fenómenos explotados, como por cierto ha ocurrido en todos los campos del progreso técnico. Arriesgándonos a hacer rechinar algunos dientes, recordemos que, en contra de una creencia extendida, no hay una relación simple y automática entre investigación e innovación.<sup>6</sup>

De hecho, se puede decir que hemos vivido siempre en un nanomundo. Para ser más riguroso, constatemos que en el mundo del que somos parte hay fenómenos que ocurren a una escala nanométrica que no nos es familiar. Estos fenómenos afectan nuestra vida cotidiana desde siempre. No han tenido la deferencia de esperar a que inventáramos las palabras «nanociencia» o «nanotecnología». Tenemos la costumbre de *aprehender* dimensiones que van de algunos metros a fracciones de milímetro. Sabemos que nuestros glóbulos rojos miden 7 milésimas de milímetro: 7 micras ( $\mu\text{m}$ ).<sup>7</sup> Hace falta descender un orden de magnitud para llegar al dominio nanométrico, situado arbitrariamente entre los 100 nanómetros ( $0,1 \mu\text{m}$ ) —el tamaño de un virus— y 0,1 nanómetros —dos veces la dimensión de la mayoría de los átomos—. El nanómetro, una milmillonésima de metro, está por lo tanto lejos de nuestra escala, pero Roger Moret<sup>8</sup> tiene razón al hacer hincapié en que se utilizan demasiados superlativos cuando se habla de nanotecnologías. Una milmillonésima de metro es pequeña, pero mil millones de metros son solo la cincuentésima parte de la distancia entre la Tierra y el Sol...

Por lo tanto, el nanomundo no es otro mundo, sino una dimensión que hemos ignorado durante mucho tiempo hasta ahora. Convivimos con seres nanométricos: los virus. Nosotros mismos estamos constituidos de materiales na-

---

<sup>6</sup> PORTNOFF, André-Yves. *Sentiers d'innovation/Pathways to Innovation*. Paris: Futuribles (Perspectives), 2003.

<sup>7</sup> Una micra es una millonésima de metro ( $10^{-6}$  metros).

<sup>8</sup> MORET, Roger. *Nanomonde. Des nanosciences aux nanotechnologies*. Paris: CNRS (Centre nacional de la recherche scientifique) Éditions, 2006.

noestructurados, es decir, de materiales cuyas estructuras se pueden describir sólo a escala nanométrica. Es el caso de nuestros huesos y de muchos materiales u objetos existentes en la naturaleza: las escamas de las alas de muchas mariposas deben sus colores irisados a nanoestructuras en su superficie. Somos parte integrante de lo que llamamos nanomundo.

Vivimos en medio de nanopartículas producidas por la naturaleza, como las salpicaduras de olas o el polvo volcánico... El elemento nuevo es que el hombre aumenta considerablemente la cantidad de nanopartículas presentes en su entorno habitual por las combustiones, desde el humo de los cigarrillos al de los coches. Los motores de combustión expulsan decenas de millones de toneladas de nanopartículas al año y se estima que la atmósfera urbana tiene entre 10 y 20 millones de partículas de menos de 100 nm por litro de aire.<sup>9</sup> Esto es lo que un peatón inhala en cada inspiración. Desde 1917 el negro de carbono se emplea para reforzar la goma de los neumáticos. En ese tiempo no se hablaba sino de partículas «ultrafinas», pero los ocho millones de toneladas de negro de carbono utilizadas al año, sobre todo en neumáticos<sup>10</sup> y tinta de impresora, ya tenían de 10 a 400 nm de diámetro. También son nanopartículas los polvos de alúmina con los cuales se pulen las obleas de silicio y los discos duros en microelectrónica. Se consumen pigmentos nanométricos coloreados, orgánicos y minerales en las pinturas y barnices, y se utili-

---

<sup>9</sup> LAURENT Louis, y PETIT Jean-Claude. *Nanosciences: nouvel âge d'or ou apocalypse?* París: CEA (Commissariat à l'énergie atomique), Departamento de investigación de la materia condensada, los átomos y las moléculas (DRECAM), 19 julio 2004.

<sup>10</sup> El negro de carbono está hecho de carbono amorfo casi puro en polvo extremadamente fino. Producido por pirólisis o por combustión incompleta, también se conoce con el nombre de *carbon black*, negro de carbono, negro de lámpara, negro de acetileno, negro de túnel... Ver VERGER, Ludovic. «Les nanocomposites aux États-Unis, vers une émergence des premières applications». *Sciences physiques*, n.º 11, mayo 2004, Servicio científico de la embajada de Francia en los Estados Unidos.

zan dos millones de toneladas de óxido de titanio en muchas industrias, una de las cuales es la de las cremas protectoras para el sol.<sup>11</sup>

Solemos creer que todo lo que es natural es bueno, pero hay muchos productos naturales, como la cicuta o el delicioso lirio de los valles, que son venenosos. Siguiendo la misma visión simplista, nuestro problema sería el de no alterar el equilibrio natural. Pero el equilibrio natural es un mito: jamás ha existido porque nuestro entorno siempre ha estado en evolución. Por otra parte, nada permite asegurar que ninguna de las nanopartículas «naturales» tenga un efecto nocivo en nuestra salud, ni tampoco se pueden considerar libres de riesgo los usos de todas las nanopartículas artificiales bajo el pretexto de que existen en la naturaleza, o que la industrialización las ha extendido desde hace tiempo, sin que hasta ahora se haya observado efecto nocivo alguno. Uno de los méritos del desarrollo de las nanociencias<sup>12</sup> es precisamente el de hacer que nos planteemos preguntas que se han eludido antes de mediados de los años noventa, así como de ayudarnos a encontrar respuestas.

---

<sup>11</sup> CARLAC'H, Dominique y HEMERY, Yves. *Étude prospective sur les nanomatériaux*. París: DIGITIP (Direction générale de l'industrie, des Technologies de l'Information et des postes), mayo 2004.

<sup>12</sup> Para una visión general de las nanociencias y las nanotécnicas, ver LAHMANI, Marcel (bajo la dirección de). *Nanosciences*. París: Belin, 2006-2007, tres tomos.





# 1

## RUPTURAS Y CONTINUIDAD

### **NANOTECNOLOGÍAS: UNA CONTINUIDAD MILENARIA...**

Que podamos trabajar a escala nanométrica es consecuencia de una continuidad milenaria de avances técnicos. Durante mil años Europa ha vivido tres revoluciones de origen tecnológico: la de la Edad Media,<sup>13</sup> la llamada industrial<sup>14</sup> y después la revolución actual de lo inmaterial,<sup>15</sup> que se inició desde hace unas décadas. En cada etapa<sup>16</sup> nuestra intervención se sitúa en un nivel cada vez más fino, ha puesto en práctica más conocimientos, ha proporcionado más poder a los actores de la sociedad y ha creado más peligros en caso de que ese poder se use de modo irracional o depravado. Se ha pasado de la selección de las especies animales y vegetales alrededor del siglo XII al nivel de los microbios con Pasteur, para llegar hoy día al nivel de los componentes de los genes.

<sup>13</sup> GIMPEL, Jean. *La révolution industrielle du Moyen Âge*. París. Seuil, 1975.

<sup>14</sup> LANDER, David S. *The Prometheus Unbound*. London: Cambridge University Press, 1965.

<sup>15</sup> PORTNOFF, André-Yves. *Le Pari de l'intelligence. Des puces, des souris et des hommes/Betting on Intelligence. Of Chips, Mice and Men*. París: Futuribles (Perspectives), 2004.

<sup>16</sup> GAUDIN, Thierry y PORTNOFF, André-Yves (eds.). «La Révolution de l'intelligence». *Science & technique*, 1983-1985.

Por lo tanto, hemos pasado de la escala del metro —altura de una vaca—, al micrómetro de un bacilo y al nanómetro de los genes. La energía se nos ha proporcionado por el movimiento de miles de metros cúbicos de agua y de aire, después por motores a vapor y de explosión que producían reacciones a la escala molecular, y hoy dividimos el átomo y diseccionamos las partículas de las que está compuesto.

Esta carrera hacia lo más pequeño no supone evidentemente que en cada etapa se pueda pasar a ignorar lo que ocurre a escalas superiores. La complejidad del mundo hace que se deba asimilar simultáneamente lo que ocurre en dimensiones diferentes, de lo infinitamente grande a lo infinitamente pequeño. Mientras que la física de partículas continúa su búsqueda mucho más allá del átomo, parece más y más importante profundizar en nuestro conocimiento de lo que pasa a escala nanométrica y actuar también en este nivel de finura.

## **...DA LUGAR A VERDADERAS RUPTURAS**

Esta preocupación no es una novedad en sí. Se ha señalado que la palabra «nanoquímica» es un bonito pleonismo, puesto que la química siempre ha consistido en hacer reaccionar átomos y moléculas,<sup>17</sup> ambas entidades nanométricas. Los metalúrgicos llevan más de medio siglo interviniendo conscientemente en la estructura nanométrica de los metales, puesto que saben modificar sus propiedades explotando «defectos» extremadamente pequeños. Estos defectos son lagunas: ausencia local de un átomo en la estructura cristalina, agregados de átomos o dislocaciones, «errores» de apilamiento de planos

---

<sup>17</sup> KLEIN, Étienne, GRINBAUM, Alexei y BONTEMS, Vincent. *Le Débat sur les nanosciences enjeux pour le CEA. Rapport Larsim*. París: Centro Georges Canguilhem, junio 2007. [http://iramis.cea.fr/Phocea/file.php?class=ast&file=file\\_748\\_2.pdf](http://iramis.cea.fr/Phocea/file.php?class=ast&file=file_748_2.pdf).

de átomos que crean una especie de escalón del espesor de un átomo.

Sin embargo, muchas propiedades físicas, mecánicas, químicas o biológicas de los materiales cambian radicalmente por debajo de ciertas dimensiones, hasta el punto de depender sobre todo del espesor de las capas, del tamaño de las partículas o de las nanoestructuras: el «cómo» empieza a tener más importancia que el «qué». Se llega así a verdaderas rupturas cualitativas. Pero la ruptura comienza con los modos de pensar que son adecuados para este asunto: nuestras referencias habituales, observa Michel Wautelet<sup>18</sup> (Universidad de Mons-Hainaut, Bélgica), ya no son válidas; nuestra intuición nos induce a error frecuentemente porque muchas reglas cambian. Los factores que en nuestra experiencia cotidiana vemos como esenciales —la gravitación, por ejemplo— pueden volverse secundarios; los efectos vistos como insignificantes toman una importancia fundamental. Este es el caso de la mecánica cuántica, algo que los ingenieros electrónicos han podido constatar desde hace ya tiempo.

### **LAS SORPRESAS DE LA FÍSICA CUÁNTICA**

La física cuántica se refiere a un grupo de teorías, entre las que se incluye la mecánica cuántica, desarrolladas desde el comienzo del siglo XX para explicar observaciones que la física y la mecánica clásicas no conseguían aclarar. Por ejemplo, en 1924 Louis de Broglie demostró que las propiedades de la luz no se pueden explicar más que si se la considera a la vez como compuesta de partículas —los fotones— y de ondas, lo cual puede parecer contradictorio. Y es necesario estar de acuerdo con Bohr en que todo objeto físico es a la vez materia y onda, pero que estos dos aspectos, corpuscular y ondulatorio, no pueden ser observados simultáneamente.

<sup>18</sup> WAUTELET, Michel *et al.* *Les Nanotechnologies*. París, Dunod, 2° éd., 2007.

A esta rama de la física se la llama cuántica porque considera que la energía emitida por un átomo no puede tomar cualquier valor, sino que toma valores discontinuos: cuantos de energía. Otro efecto contrario a nuestra intuición es el principio de incertidumbre de Heisenberg, según el cual no se puede medir con precisión y a la vez la posición y la velocidad de una partícula. El efecto túnel, al que se hace referencia muchas veces en este libro, explica que, en las condiciones en las que interviene la mecánica cuántica, una partícula —el electrón, por ejemplo— tiene una cierta probabilidad de pasar una barrera de potencial que corresponde a un nivel energético prohibido según la mecánica clásica. Esto se puede comparar, grosso modo, con una colina que un objeto consigue franquear sin hacer el esfuerzo de escalarla, como si pasara a través de un túnel. La física cuántica puede sorprender nuestros sentidos, pero muchas de sus proposiciones se han comprobado experimentalmente y hay muchas aplicaciones prácticas que están basadas en ella.

---

Para ahondar en el tema: KLEIN Étienne, *Petit Voyage dans le monde des quanta*. Paris: Flammarion (Coll. Champs), 2004; LEVY-LEBLOND Jean-Marc. *De la matière relativiste, quantique, interactive*. Paris: Seuil, 2006; KLEIN Etienne «Comment la physique quantique est-elle née?» Conférences de la Cité des sciences et de l'industrie (La Villette), 13 janvier 2007, en la siguiente página web: [www.cite-sciences.fr/francais/ala\\_cite/college/v2/html/2006\\_2007/conferences/conference\\_302.htm](http://www.cite-sciences.fr/francais/ala_cite/college/v2/html/2006_2007/conferences/conference_302.htm)

De hecho, la carrera de la miniaturización hizo entrar a la microelectrónica en el dominio nanométrico hace tiempo: la anchura mínima de línea de los procesos fotolitográficos ha pasado de 55.000 nm en 1960 a 65 nm en 2005, 45 nm en 2007... En la actualidad algunos efectos característicos de la mecánica cuántica comienzan a hacerse notar. Si esta evolución continuara, los efectos serían prohibitivos/limitadores hacia 2014: se llegaría, como explica Jean-Paul Colin,<sup>19</sup> a transistores más pequeños que el nanómetro, con longitudes de dos o tres átomos de silicio, incapaces de permitir o impedir con certeza el paso de un electrón porque su

---

<sup>19</sup> Experto en tecnología informática tras una larga carrera en Intel. Ver COLIN, Jean-Paul. «La loi de Moore: quelles limites?» e «Informatique, l'après-Moore?» *Futuribles*, n.º 278, septiembre 2002, pp. 49-56 y n.º 294, febrero 2004, pp. 5-15, respectivamente.

comportamiento se habría convertido en probabilístico. El grifo de electrones que debe constituir un transistor deja de cumplir su función de lógica binaria a medida que nos aproximamos a esa barrera cuántica. Hay un punto muerto teórico que va a obligar a la electrónica a encontrar otras vías, y muchas de ellas se abrirán por las nanotecnologías.

### **¿ES LA MICROELECTRÓNICA YA UNA NANOCIENCIA?**

En electrónica se define la *anchura mínima de línea de los procesos de fotolitografía* por la longitud de los transistores elementales o, para ser más precisos, de su puerta lógica (gate en inglés). Esta lleva ese nombre para recordar la función de la rejilla que, en los triodos, deja pasar o bloquea el flujo de electrones entre el cátodo y el ánodo dependiendo de la diferencia de potencial que se aplique.

En la electrónica de estado sólido este componente ya no es una rejilla, sino una capa de metal o de silicio policristalino que controla el paso de la corriente entre los otros dos componentes esenciales del transistor: la fuente y el colector. En un microprocesador los transistores elementales no tienen todos el mismo tamaño. Tomemos los más pequeños, que son también los más comunes: la longitud de la puerta y el espacio entre dos transistores son idénticos hasta que se alcanza una finura de 180 nm. Por debajo de este nivel, esto ya no ocurre y el significado de la cifra que se da para la finura del ataque con ácido es menos simple. A 65 nm, por ejemplo, la longitud de la puerta es 35 nm, pero la distancia entre dos transistores sobrepasa ligeramente los 65 nm, y todo esto depende del fabricante y del proceso de producción de cada uno.

Hay otra ruptura que ha impresionado aún más la imaginación de los especialistas y del público, la cual contradice las prácticas milenarias. Estas se basan en la intervención a nuestra escala sobre cantidades macroscópicas de materia para inducir transformaciones de tamaño submicroscópico: «Hacemos que la carne sea digerible al provocar un conjunto de reacciones químicas entre moléculas durante la cocción»,<sup>20</sup> laminamos el acero para modificar su estructura

<sup>20</sup> THIS, Hervé (2002), *Casseroles et éprouvettes*. París: Belin.

fina. «En metalurgia, los precipitados nanométricos son probablemente tan antiguos como las aleaciones mismas», recuerda Hervé Arribart, director científico de Saint-Gobain Recherche. Estos son los conocidos como enfoques de arriba a abajo (*top-down*). Pero desde 1959, Richard Feynman, premio Nobel de física, propone un enfoque ascendente (*bottom-up*): ¡construyamos objetos como queramos a partir de los ladrillos básicos que son los átomos! Uno de los primeros ejemplos exitosos de este enfoque ascendente fue la «escritura» en 1990 de la palabra «IBM» en letras de 5 nm de alto. Para ello, Donald Eigler depositó 35 átomos de xenón uno a uno sobre una base de níquel con la ayuda de un microscopio de efecto túnel.<sup>21</sup>

## **LOS PRIMEROS BALBUCEOS DEL ENFOQUE ASCENDENTE**

En el nivel conceptual, el enfoque conocido como ascendente corresponde, efectivamente, a un momento decisivo. Pero las aplicaciones prácticas todavía son lejanas y no se podría decir con exactitud si la mayoría de sus promesas se harán realidad algún día.

La invención en 1981 del microscopio de efecto túnel (*Scanning Tunnelling Microscope - STM en inglés*) ha abierto muchas esperanzas. El STM proporciona una imagen de la distribución de los átomos en la superficie de un objeto hecho de material conductor.<sup>22</sup> Para ello la superficie del objeto examinado es barrida a un nanómetro de distancia por una punta tan fina que su extremo está formado solamente por uno o dos átomos. La superficie emite una dimi-

---

<sup>21</sup> El efecto túnel permite, a escala cuántica, que una partícula cruce una barrera de potencial en condiciones consideradas imposibles por la mecánica clásica.

<sup>22</sup> El STM da una imagen de la distribución de la densidad electrónica de la superficie, lo que permite deducir la disposición de los átomos. Ver en particular la página web [www.lgep.supelec.fr/ce/STM.htm](http://www.lgep.supelec.fr/ce/STM.htm).

nuta corriente eléctrica que crece exponencialmente cuando la punta se acerca a pocas décimas de nanómetro. Gracias a un dispositivo informatizado de retracción, los investigadores de IBM en Zurich han conseguido regular la altura de la punta de la aguja para mantener constante la corriente mientras se produce el barrido. A partir de estos datos, un ordenador reconstruye una imagen del relieve de la superficie, visualizando de esta forma incluso los átomos.

Utilizando el mismo aparato, otros investigadores han podido mover uno a uno átomos de gas xenón sobre una superficie de metal para componer distintos motivos, comenzando con las tres letras IBM. La técnica es espectacular, pero no se presta por el momento a aplicaciones industriales. El microscopio de fuerza atómica (AFM, por *Atomic Force Microscope*) ha extendido las posibilidades de investigación del STM a los objetos no conductores. Por ejemplo, se puede observar en el aire o en un líquido el ADN (ácido desoxirribonucleico) y sus interacciones con las proteínas.

## **CUANDO LA INTUICIÓN NOS LLEVA POR EL CAMINO EQUIVOCADO**

Si bien el enfoque ascendente nos permite soñar, con todo la aparición a escala nanométrica de propiedades desconcertantes de la materia es lo que en este momento crea a la vez obstáculos que hay que salvar y posibilidades prácticas que se pueden explotar. La experiencia nos ha enseñado que pueden darse cambios cualitativos cuando se desciende hacia lo muy pequeño.

Se sabe desde hace mucho tiempo que la harina provoca explosiones en los molinos si está en suspensión en el aire en forma muy fina. Cuando se divide la materia, las propiedades —casi intactas todavía al nivel de la micra— cambian radicalmente, sobre todo porque las superficies relativas aumentan considerablemente, lo que supone que la



proporción de átomos situados en la superficie crece rápidamente, pasando de alrededor de 5% para una partícula de 20 nm de radio, a 50% si el diámetro no es mayor de 3 nm. La mitad de los enlaces de estos átomos superficiales no están unidos a otros átomos: esto vuelve extremadamente reactivo a un producto normalmente poco combustible, como la harina, o a un metal inerte, como el oro.

Este producto dividido en paquetes de 5 nm se vuelve un catalizador. La importancia relativa de las superficies hace que los roces tengan más importancia que la gravedad, lo que explica que los polvos nanométricos puedan permanecer largo tiempo en suspensión sin asentarse. Las fuerzas de adhesión conocidas como fuerzas de van der Waals, que sólo actúan a muy corta distancia, son también proporcionales a la dimensión de estas superficies. Hacen que las partículas se junten unas con otras o con las paredes con las que se encuentren. Las nanopartículas en la atmósfera se aglomeran rápidamente en grupos grandes y se fijan rápidamente a otras moléculas presentes en el aire, lo que no hace fácil su estudio y puede también tener graves consecuencias sobre la salud.

El nanomundo es tan desconcertante que a menudo reta nuestro conocimiento: estamos equipados para describir y predecir las propiedades mecánicas, físicas, químicas de la materia a escala macroscópica y «los químicos teóricos saben calcular las propiedades de las moléculas desde hace tiempo; este es el dominio de la química cuántica», apunta Michel Wautelet.<sup>23</sup> Pero «calcular las propiedades de nanopartículas que constan de varios centenares de átomos es imposible». Las reglas válidas a nuestra escala no se pueden extrapolar hacia lo muy pequeño y las reglas válidas a escala atómica no se pueden extrapolar a lo muy grande. Hay que razonar de otra manera y desconfiar de nuestra intuición basada en la experiencia cotidiana, porque la física cuántica introduce muchos efectos

---

<sup>23</sup> WAUTELET, Michel y otros. *Op. cit.*

que chocan con nuestra intuición. El bonito color amarillo del oro nos es familiar, pero cuando las partículas del metal precioso alcanzan dimensiones próximas a la longitud de onda de la luz visible, aparecen rojas o azules. El óxido de titanio, pigmento blanco apreciado en la pintura por su capacidad de proteger, sólo es opaco a los rayos ultravioleta; de ahí su utilización habitual en las cremas protectoras para la radiación solar.

En el nanomundo las constantes físicas también fluctúan. Hace ya un siglo, el ruso P.I. Pawlov observó que la temperatura de fusión —constante a nuestra escala— disminuía con el tamaño de las partículas. Se sabe que el plomo funde a 328 °C, pero cuando se divide en cristales de varios nanómetros se vuelve ya líquido a unos 150 °C. Algunas nanopartículas son muy inestables, y alternan el estado sólido y líquido, o fluctúan entre distintas asociaciones cristalinas que coexisten a una misma temperatura. Dependiendo de su forma geométrica, sus propiedades pueden también cambiar enormemente y en el futuro habrá que tener en cuenta todo esto en el diseño de circuitos electrónicos.



# 2

## LA GAMA DE NANOTECNOLOGÍAS

La gama de herramientas que ofrecen las nanotecnologías incluye, además de partículas ultrafinas, otras, en las cuales al menos una de las dimensiones —el diámetro, por ejemplo— es nanométrica. Estas incluyen las fibras, hilos, tubos y películas muy delgadas: materiales cuyas superficies o estructura interna no pueden describirse más que a escala nanométrica. Las máquinas y los aparatos fabricados a partir de elementos nanométricos ya existen: circuitos electrónicos y biochips, de los que hablaremos más adelante.

### ENTRE EL FÚTBOL Y EL RUGBY

Mientras algunas nanopartículas son inestables, otras son sorprendentemente estables, como los fullerenos: moléculas en forma de balones de fútbol o de rugby, constituidas respectivamente por 60 o 70 átomos de carbono repartidos en pentágonos y hexágonos. Fueron descubiertos en 1985 por Harold Kroto (Sussex University, Gran Bretaña), Richard Smalley y Robert Curl (Rice University, EE. UU.) al vaporizar grafito con un láser. También son estables las nanopartículas de negro de carbono utilizadas por miles de toneladas, mucho antes de este descubrimiento, así como el humo de sílice. Estas últimas han demostrado que los contaminantes

pueden volverse una fuente de riqueza. Este ejemplo es importante por la imagen que muchos tienen del desarrollo sostenible como otra limitación. Estas partículas de silicio amorfo, producidas actualmente por centenares de miles de toneladas, no eran más que un desecho contaminante en la atmósfera, a finales de 1970;<sup>24</sup> sin embargo, una vez incorporadas al cemento de alto rendimiento, lo fluidifican y triplican su resistencia en compresión, resultado que no da la arena, aunque ésta sea, sobre todo, sílice.

Algunas de estas «nuevas» nanopartículas se componen de moléculas conocidas de toda la vida. Es el caso de las arcillas divididas en apilamientos de una decena de laminillas de menos de un micrómetro de lado. Mientras que el añadido de arcilla ordinaria no modifica la inflamabilidad del poliestireno, sólo un 3% del polvo nanométrico reduce a la mitad el calor generado por este plástico cuando se quema. Haría falta añadirle 30% de un compuesto de bromo para conseguir el mismo resultado, con el inconveniente de la emanación de peligrosos vapores de bromuro en caso de incendio. Otro efecto del tamaño se observa cuando un material que es habitualmente opaco se introduce bajo forma de cargas de dimensiones inferiores a la longitud de onda de la luz visible en ventanas de vidrio o poliméricas. Entonces este hace que aumente su resistencia mecánica sin modificar su transparencia. La misma técnica se puede utilizar para producir papeles de embalar que dejan pasar la luz, pero que son impermeables a ciertos gases.

La excitación por radiación de productos fluorescentes produce habitualmente otra radiación de una longitud de onda determinada que es independiente de su tamaño. No es así para los nanocristales semiconductores conocidos como *quantum dots* o puntos cuánticos: los cristales de seleniuro de

---

<sup>24</sup> Este ejemplo viene del norte de Europa, pero ha tardado tiempo en convertirse en habitual. Desde 1952 el cemento de un túnel de Oslo contiene humo de sílice. GAGNON, Frédéric, *Enrobage de l'armature dans le béton projeté: Évaluation et effets*. Laval (Canadá): Universidad Laval, tesis 2004, disponible en [www.theses.ulaval.ca/2004/22341/ch02.html](http://www.theses.ulaval.ca/2004/22341/ch02.html).

cadmio, cuando están expuestos a luz ultravioleta, aparecen azules, verdes, amarillos o rojos, dependiendo de que midan de dos a cinco nanómetros, a causa de un efecto cuántico. Estas partículas ya se están empezando a utilizar como marcadores luminosos en biología y en medicina. Cuando se recubren de una delgada capa de productos que las hacen solubles en una solución acuosa y que se puedan adherir a las moléculas biológicas que se quieren estudiar, permiten identificar una proteína y seguir sus desplazamientos en células vivas, como si fueran diminutas balizas luminosas.<sup>25</sup>

Si se pasa de las nanopartículas a los nanoobjetos, los nanotubos de carbono tienen el papel estrella desde que en 1991 el japonés Sumio Iijima, de Nec, observó su formación al vaporizar el grafito. Estos nanotubos son cilindros huecos de algunos nanómetros de diámetro y de longitudes a veces de una décima de milímetro. Sus propiedades son más que prometedoras: son mucho más resistentes a la compresión que las fibras de carbono o que el acero, a pesar de lo cual están dotados de una gran flexibilidad y de una buena plasticidad. Son los refuerzos preferidos para materiales compuestos de alto rendimiento.

Dependiendo del ángulo de enroscado de la capa de sus átomos, estos compuestos pueden ser aislantes o mejores conductores que el cobre y el oro, lo cual es interesante para los ingenieros eléctricos y electrónicos. En cuanto al calor, son mejores conductores que el diamante, que es el mejor conductor térmico conocido hasta ahora. Finalmente su superficie específica es enorme, del orden de 250 metros cuadrados por gramo, lo que los hace muy adsorbentes. Hay ya planes para usarlos como almacenes, especialmente de hidrógeno, y como catalizadores.

La organización de la materia es por tanto más determinante que las consideraciones cuantitativas, porque, dependiendo de la distribución de los mismos átomos de car-

---

<sup>25</sup> BROKMANN, Xavier, HERMIER, Jean-Pierre, DESBIOLLES, Pierre y DAHAN, Maxime. «Des nanosources de lumière pour l'optique et la biologie», en *Images de la physique*. París. CNRS, 2005, pp. 126-132.

bono, se pasa de los fullerenos a los nanotubos, del diamante que raya el vidrio al grafito de los lápices que se deshace sobre el papel y de algunos euros por kilogramo ¡a millones de euros el gramo!

Hay muchos otros nanoobjetos longitudinales, los nanotubos poliméricos o los nanohilos, como las triquitas o los *whiskers* (bigotes de gato): monocristales en forma de filamentos muy finos conocidos desde hace mucho tiempo y que tienen grosores micrométricos. Ejemplos clásicos son las alas iridiscentes de las mariposas o las hojas de los nenúfares, que son repelentes al agua. Muchos objetos en la naturaleza deben sus propiedades a la estructura nanométrica de su superficie. Nuestros huesos, el coral, el nácar y muchos otros materiales naturales tienen también una estructura nanométrica.

Los carbonos activos, los geles de sílice y las zeolitas naturales o de síntesis tienen poros de varios nanómetros. Esto es lo que permite la utilización actual de las zeolitas, que tienen una composición química próxima a la de las arcillas, como intercambiadores de iones, trampas moleculares, tamices moleculares o soportes para catalizadores, cuanto mayor es la superficie interna de los catalizadores, más eficaz es la catálisis. Desde hace varios años se han fabricado aleaciones metálicas y se han construido materiales cerámicos con granos, sus cristales elementales, de varios nanómetros. Por lo tanto, hay casi tantos átomos en las juntas de los granos que dentro de ellos. De repente, las cerámicas, que son habitualmente frágiles, se vuelven superplásticas: se les puede dar forma por presión (*stamp*), porque en ciertas condiciones se deforman como la plastilina.

## **DE LAS ANTENAS DE TELEVISIÓN TRADICIONALES A LAS PARABÓLICAS**

El que hayamos sido capaces de producir películas de varios nanómetros de grosor abre perspectivas aún más inno-

vadoras, de momento, que las de los materiales con una masa nanoestructurada. La Academia francesa de las tecnologías nos recuerda que, si «ya no son los operadores de telecomunicaciones los que controlan los satélites, sino los distribuidores, y [si] cada uno puede orientar su antena parabólica como quiera hacia su satélite preferido en su balcón»,<sup>26</sup> es debido a que desde 1980 los transistores de «gas de electrones bidimensionales» de Thomson-CSF y Fujitsu han podido explotar un efecto cuántico. En los semiconductores de grosor de menos de 20 nm los electrones sólo se mueven en el plano de las láminas; esto permite construir transistores en los que el ruido se reduce tanto que pueden amplificar señales muy débiles. Por lo tanto se ha podido reducir el tamaño y la potencia de los satélites de telecomunicaciones y recibir sus señales con antenas parabólicas, cuyos diámetros se han reducido de 2 m a 60 cm.

Usamos habitualmente en nuestros ordenadores otro fenómeno cuántico característico de las láminas delgadas. En los años 1970 el profesor Albert Fert,<sup>27</sup> entonces un joven investigador en Orsay, se interesó en el *spin*, esa propiedad cuántica de los electrones que se puede comparar con «una minúscula aguja imantada fijada sobre cada electrón» y que resulta de la rotación de la partícula sobre sí misma. El investigador probó que los campos magnéticos, al actuar sobre el *spin* de los electrones, afectan su movimiento (y como consecuencia, a la corriente eléctrica). En resumidas cuentas, que una lámina delgada de hierro o de níquel, ambos metales ferromagnéticos,<sup>28</sup> no deja pasar más que los electrones cuyos *spines* tienen la misma orientación que su campo magnético.

---

<sup>26</sup> CORRIU, Robert y NOZIÈRES, Philippe, bajo la dirección de WEISBUCH, Claude. *Nanosciences, nanotechnologies*. París: Lavoisier, 2004, «Rapport sur la Science et la Technologie», n.º 18, p. 295.

<sup>27</sup> Albert Fert, premio Nobel de Física 2007, es profesor en la Universidad Paris-Sud, director científico de la unidad mixta de física CNRS/Thales, y es medalla de oro del CNRS.

<sup>28</sup> Los materiales ferromagnéticos se imantan bajo el efecto de un campo magnético.



Este descubrimiento no tuvo ninguna aplicación práctica hasta 1988. En ese momento la técnica hizo posible fabricar sándwiches de estratos metálicos de espesor nanométrico. Albert Fert estudia el paso de una corriente eléctrica a través de dos láminas magnéticas separadas por una capa muy fina de metal no magnético como el cromo. «Si estas dos láminas tienen imantaciones opuestas» —constata—,<sup>29</sup> «una detiene a los electrones de una cierta orientación de spin y la segunda para a los otros. La corriente no pasa o casi no pasa. En cambio, en presencia de un campo magnético las imantaciones de las dos láminas se alinean en una misma dirección, todos los electrones cuyo spin tiene esta dirección atraviesan sin problema ambas láminas y la corriente pasa.<sup>30</sup> Este pequeño campo será, por ejemplo, el generado por las inscripciones magnéticas en el disco duro de un ordenador cuando se aplica la GMR (magnetorresistencia gigante) a las cabezas de lectura.»

En la experiencia de Orsay, cuando la capa de cromo no era más gruesa que tres átomos, la resistencia eléctrica causada por el campo magnético aumentaba un 80%. Esta magnetorresistencia, descubierta casi simultáneamente en Alemania por el equipo de Peter Grünberg, premio Nobel de Física de 2007, fue tan pronunciada que se calificó de gigante. A partir de 1993, los captos basados en la magnetorresistencia gigante han sido explotados por el sector del automóvil y la industria de defensa para detectar campos magnéticos débiles y por la medicina para hacer un seguimiento de marcadores magnéticos en el cuerpo humano. IBM encontró una aplicación masiva para sus cabezas de lectura de disco duro, lo que permitió centuplicar la densidad de almacenamiento de datos. La electrónica basada en el *spin*, o «spintrónica», nos prome-

---

<sup>29</sup> Del discurso de la ceremonia de recepción de la medalla de oro 2003 del CNRS.

<sup>30</sup> Este es el efecto GMR: Giant Magnetoresistance (magnetorresistencia gigante).

te transistores más pequeños que consumen menos energía, una apuesta importante a escala mundial.

## HACIA UNA ELECTRÓNICA SIN SILICIO

Hace falta prepararse para un mundo sin silicio, del mismo modo que nos estamos preparando para el mundo sin petróleo. En el caso del silicio, apunta Jean-Paul Colin, no son las reservas geológicas las que corren el peligro de agotarse, sino el potencial de progreso de los componentes —transistores, diodos, memorias o componentes de pantallas planas—, que podrían explotar las propiedades de los nanotubos de carbono. Como hilos conductores de interconexiones en los componentes integrados, soportarían corrientes mucho más altas que las toleradas por el cobre o el oro. En 2001, Cees Dekker (Delft University of Technology, Países Bajos) ha hecho funcionar a temperatura ambiente un transistor «de un solo electrón»<sup>31</sup> (Single Electron Transistor) basado en un tubo de carbono. Esto apunta avances no sólo en miniaturización, sino también en rendimiento, porque la generación de calor se reduciría notablemente. IBM ha experimentado con un transistor basado en nanotubos de carbono capaz de transportar una corriente dos veces mayor que la permitida por un transistor de silicio.

## LA ELECTRÓNICA MOLECULAR

El nanotubo de carbono no es más que una de las moléculas estudiadas, por lo que se conoce a partir de entonces como electrónica molecular, campo activamente explorado

---

<sup>31</sup> Los transistores de este tipo, conocidos como SET (*Single Electron Transistors*), explotan un efecto cuántico conocido como barrera de Coulomb al utilizar solo un electrón para la función «encendido» o «apagado». Los SET anteriores no funcionaban más que a muy bajas temperaturas. Ver WAUTELET, Michel, *et al. Op. cit.*, p. 88.

desde 1980 en Gran Bretaña, en Alemania y después en el resto de países. El objetivo es construir hilos conductores y componentes explotando las posibilidades de transferencia de un electrón en el interior de una molécula o entre dos moléculas determinadas, especialmente moléculas orgánicas que contienen átomos de hierro o de azufre en determinados emplazamientos. Otro camino, el de la spintrónica molecular, fue iniciado por Olivier Kahn (Universidad de Paris-Orsay y, posteriormente, Universidad de Burdeos) y Joël Miller (DuPont de Nemours), cuando obtuvieron los primeros ferroimanes moleculares.

Lo que explicaba con pasión y clarividencia desde 1989 el añorado Olivier Kahn sigue siendo válido: la química molecular<sup>32</sup> promete una oferta casi ilimitada de estructuras moleculares hechas a medida —algo que la química inorgánica no puede ofrecer—, una gran flexibilidad de soluciones, procesos productivos más respetuosos con el medio ambiente y ahorro de energía. El tamaño actual de los componentes podría dividirse por 100 y se espera poder beneficiarse de una propiedad de las moléculas largamente explotada por los seres vivos: la autoorganización, es decir, su facultad de asociarse espontáneamente en estructuras organizadas más grandes.

Estas ventajas se encuentran también en algunos materiales plásticos, los polímeros conjugados,<sup>33</sup> que pueden hacerse conductores de electricidad como los metales. De ahí que se los llame metales plásticos o *synthetic metals*. Estos polímeros combinan en un solo material las propiedades eléctricas de los metales y las propiedades mecánicas y otras características de los polímeros: plasticidad, ligereza, facilidad de fabricación y precio moderado.<sup>34</sup> El pri-

---

<sup>32</sup> BARRAUD, André, KAHN, Olivier y LAUNAY, Jean-Pierre. «L'aube de l'électronique moléculaire». *Sciences & Technologies*, mayo 1989, pp. 54-68.

<sup>33</sup> Los polímeros conjugados se caracterizan por una alternancia de enlaces dobles y simples a lo largo de una cadena de átomos de carbono, lo cual hace que los electrones estén deslocalizados (electrones pi).

<sup>34</sup> WAULETEL, Michel *et al.* *Op. cit.*, p.103.

mer transistor «enteramente polimérico» se desarrolló en 1990 por Francis Garnier y su equipo (CNRS, Thiais), que demostraron así la posibilidad de fabricar componentes electrónicos sin necesidad de hacerlo en cámaras limpias.<sup>35</sup> Francis Garnier entrevió ya las aplicaciones en pantallas flexibles. Los tres objetivos perseguidos en estos momentos están relacionados no solo con los componentes electrónicos, sino también con células fotovoltaicas económicas y flexibles (aunque su eficiencia todavía es insuficiente) y los diodos electroluminiscentes, que sirven sobre todo para fabricar las pantallas de anuncios conocidas como OLED (*Organic Light Emitting Diodes*) que están empezando a comercializarse.

## DE LOS NANOMATERIALES A LOS NANOAPARATOS

En otra combinación de tecnologías muy diferentes, los biochips combinan técnicas de circuitos integrados y de genética. En 1989, en Palo Alto, un equipo de la sociedad neerlandesa Affymax inventó el primer chip de ADN. Desde entonces se ha aprendido a fijar proteínas o miles de fragmentos de ADN o ARN (ácido ribonucleico) sobre un soporte de vidrio o de silicio.<sup>36</sup> Cada hebra juega el papel de una sonda o de un captador porque reacciona cuando detecta la presencia de una hebra complementaria.<sup>37</sup> Un marcador fluorescente fijado en la sonda hace esta reacción visible.

Veremos más tarde las aplicaciones. Los «laboratorios» de análisis formados de chips serán tratados más detallada-

---

<sup>35</sup> Las cámaras limpias son laboratorios con una atmósfera estrictamente controlada.

<sup>36</sup> Ver en particular *Biopuces 2007. Les biopuces: une technologie en mouvement*. París: Paris Développement, septiembre 2007.

<sup>37</sup> Hay que recordar que el ADN está formado por dos hebras de secuencias de nucleótidos complementarios estrechamente unidas.

mente en el capítulo dedicado a la salud. Se están investigando verdaderas máquinas, motores rotativos o lineales formados por algunas moléculas, «camiones» moleculares capaces de desplazarse sobre una superficie... Algunos van más lejos y creen que los nanorobots serán capaces de producir nanoobjetos, pero las aplicaciones están aún muy lejos, aunque éstas inspiren páginas de ciencia ficción y algunas veces de ciencia aflicción. Uno de los problemas es suministrar la energía necesaria para el funcionamiento de estas máquinas que se sueña con implantar en el cuerpo humano para reparar sus males.

# 3

## **PERSPECTIVAS PROMETEDORAS PARA LA SALUD**

### **DETERMINAR CUÁLES SON LAS CÉLULAS ENFERMAS**

Una de las ambiciones más nobles de las nanotecnologías en el mundo entero, desde Europa o los Estados Unidos a la India, es mejorar la salud y, sobre todo, poder curar mejor el cáncer, destruyendo selectivamente las células malignas y reduciendo los efectos secundarios del tratamiento. Como explica un informe de la Academia francesa de las tecnologías, «tratando la superficie de las nanopartículas para impedir la adsorción de las proteínas que las dirigen hacia el hígado, y fijando un anticuerpo específico del órgano que se quiere tratar, se puede en principio alcanzar cualquier órgano de modo específico».<sup>38</sup> Esto supone una identificación «activa», pero también es posible una identificación «pasiva». Las paredes de los vasos sanguíneos son muy permeables en las zonas próximas a los tumores y pueden dejar pasar y permitir la acumulación de nanopartículas suficientemente finas. En la actualidad es posible hacer que nanopartículas magnéticas de óxido de hierro se concentren en los tejidos enfermos sin extenderse al resto del cuerpo. Entonces se las activa

---

<sup>38</sup> *Les Nanotechnologies, enjeux et conditions de réussite d'un projet national de recherche*. París: Académie des technologies, 24 noviembre 2002, informe del grupo de trabajo «Nanotecnologías».

con rayos X, láser o ultrasonidos para actuar sobre las células malignas. Dividido en partículas nanométricas, el óxido de hierro excitado por un campo magnético genera mucho más calor que a nuestra escala: las cantidades muy pequeñas de partículas introducidas en los tumores son por tanto suficientes para calentar los tejidos por encima de 43 °C, lo que puede hacer más eficaces los tratamientos de radioterapia y quimioterapia, y destruye directamente las células cancerosas calentándolas a temperaturas aún más elevadas.

La sociedad MagForce Technologies AG, creada por el doctor Andreas Jordan (Hospital Charité-Universitätsmedizin, Berlín), probó en 2003 la eficacia de esta nanoterapia en estudios clínicos primarios en 14 pacientes con glioblastoma (cáncer del cerebro). En estos momentos hay ensayos en marcha para cánceres de próstata. En Francia, NanoBiotix, fundada en 2003 por Laurent Lévy, antiguo investigador del CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique) y de la Universidad de Búfalo, explota una licencia de esta universidad americana y de otras patentes para destruir células malignas inyectando por vía intravenosa nanopartículas de hierro cubiertas de óxido de silicio. En estos momentos hay ensayos preclínicos en curso para tratar distintos tipos de cáncer.

El oro también entra en esta batalla gracias a las investigaciones llevadas a cabo en la Rice University: Nanospectra Biosciences propone desde 2002 utilizar nanoconchas (*nanoshells*), partículas de 135 nm cubiertas de oro para evitar reacciones del sistema inmune. Estas partículas son demasiado grandes para entrar en los tumores, pero se fijan sobre ellos y los destruyen cuando se las calienta desde el exterior con ayuda de un láser infrarrojo que es eficaz hasta una profundidad de 15 cm dentro del cuerpo. También se están llevando a cabo experimentos con nanohilos de oro producidos por Nanopartz,<sup>39</sup> y se empieza a

---

<sup>39</sup> Nanopartz es una división de Concurrent Analytical Inc. (Concana), que se fundó en 2002 en colaboración con la Universidad de Utah gracias a capital americano federal civil y militar y a contribuciones privadas.

pensar que estas partículas de oro no queman las células cancerígenas, sino que las dañan perforando sus paredes.<sup>40</sup> En total, menos de media docena de jóvenes empresas utilizan nanopartículas activables para aplicaciones médicas y ellas no se consideran verdaderamente competidoras, afirma Laurent Lévy, sino promotoras de un nuevo campo.

Un reto que tienen estos nanorremedios es la administración más eficaz y con menos inconvenientes de los productos no solubles en el agua y que, hasta la fecha, hay que disolver en un disolvente más o menos tóxico. Desde 1995 se introduce doxorrubina en liposomas (vesículas artificiales con paredes que consisten en una capa de lípidos) para luchar contra el sarcoma de Kaposi y el cáncer de ovarios, pero estas vesículas son poco estables. También se están desarrollando nanopartículas de polímeros biodegradables, que pueden liberar moléculas activas en el organismo a velocidad controlada.

Las nanopartículas de albúmina aparecen como vectores eficaces. Esto se demostró con el Abraxane, introducido en 2005 contra los cánceres de mama con metástasis. Los resultados han sido tan alentadores que el año siguiente Canadá autorizó su uso directo y no sólo en caso del fallo de medicamentos clásicos. Se espera poder atacar de igual manera otros cánceres. Con Abraxane, la molécula activa de paclitaxel,<sup>41</sup> que es insoluble en agua y está recubierta de nanopartículas de albúmina, se inyecta en suspensión acuosa al paciente. La *start-up* francesa BioAlliance Pharma ha explotado un principio parecido. Su *Transdrug*, que ahora está en ensayos clínicos en fase III,<sup>42</sup>

---

<sup>40</sup> «Ruée sur les nanoparticules d'or: des applications prometteuses en médecine» *Nano Québec*, 15 octubre 2007.

<sup>41</sup> La molécula activa se encuentra en la corteza de los tejos del océano Pacífico. Corresponde a la medicina conocida como Taxotere.

<sup>42</sup> Los ensayos de medicamentos en fase III se hacen sobre miles de personas. La fase siguiente consiste en estudios a largo plazo de los efectos de un medicamento ya comercializado.



permite un uso más eficaz de la *doxorrubina* contra el cáncer de hígado en estado preliminar. Se transporta en nanopartículas de cianoacrilato, un polímero bien conocido por la gente que hace bricolaje como pegamento instantáneo. Las partículas cortocircuitan el mecanismo de reconocimiento que bloquea habitualmente a la doxorrubina y la conducen hasta las células tumorales. La Federal Drug Agency (FDA) americana y la Agencia Europea del Medicamento (EMA) han dado a *Transdrug* el estatus de medicamento huérfano.<sup>43</sup>

Para distribuir los medicamentos de un modo más eficaz hay muchas otras soluciones estudiadas activamente por un centenar de sociedades en el mundo,<sup>44</sup> incluyendo la del uso de nanotubos de carbono como contenedores. Los dendrímeros, polímeros en forma de erizos dotados de largas agujas que no miden más que unas decenas de nanómetros, pueden ser portadores por la posibilidad de contener cavidades en el interior de sus complejas estructuras. En 1979 Donald A. Tomalia, investigador de Dow Chemical, hizo la primera síntesis de un dendrímero: a continuación fundó Dendritic NanoTechnologies Inc. (DNT), que fue comprada en 2006 por la australiana Starpharma. Esta última está llevando a cabo actualmente ensayos clínicos en humanos con VivaGel™, un gel microbiocida para prevenir la transmisión sexual del sida en las mujeres.

Una manera fácil de solventar el problema de la insolubilidad en medio acuoso de algunos medicamentos, al menos en principio, es la de reducirlos a polvo nanométrico y estabilizar los granos para que no se aglomeren. Bajo esta forma, los medicamentos insolubles se administran en suspensión en líquidos o por pulverización; así son suficientemente pequeños para propagarse a través de los capilares. Varios medicamentos utilizan esta técnica desde 2000:

---

<sup>43</sup> Los medicamentos huérfanos son los que tratan enfermedades huérfanas; aquellas demasiado poco frecuentes como para ofrecer un mercado económicamente atractivo para la industria farmacéutica.

<sup>44</sup> *The Nanotech Revolution in Drug Delivery*. Londres: Científica 2007.

un antidepresivo y un fenofibrato (anticolesterol). El promotor, la sociedad Élan, ha bautizado esta técnica como NanoCristal.

La obtención de nuevas propiedades al reducir el tamaño también es aplicable a los líquidos. ¿Quién hubiera imaginado que el aceite de soja podría convertirse en un potente desinfectante? Gotitas de aceite de unos cuantos centenares de nanómetros de diámetro tienen tensiones superficiales tan fuertes que se fusionan a cualquier cuerpo graso que encuentren. Se pegan a las bacterias y virus que encuentran en su camino y destruyen sus cubiertas. NanoBio, fundada por investigadores de la Universidad de Michigan, está haciendo pruebas para combatir el herpes labial con una emulsión de agua y aceite que contiene un antiviral activo, antibacteriano y fungicida, que acelera la cicatrización. NanoBio se basa en el mismo principio para desarrollar una vacuna contra el ántrax que se suministre pulverizando por la nariz, y emulsiones capaces de penetrar más profundamente en la piel a profundidad suficiente para tratar infecciones dermatológicas sin que los medicamentos se distribuyan por todo el organismo, evitando de este modo riesgos hepáticos y cardíacos.

## **HACIA UNA MEDICINA REGENERATIVA**

Si las nanopartículas transportan moléculas de medicamentos y las protegen, se esperaría que los materiales nanoporosos permitan implantar células pancreáticas en los diabéticos para que dejen de inyectarse insulina durante años o, mejor aún, definitivamente. Desde 1980, basándose en los trabajos de Anthony M. Sun de la Universidad de Toronto, se ha intentado injertar a los diabéticos los «islotos de Langerhans», esas agrupaciones de células que secretan insulina, y encapsularlas en un material semipermeable para evitar que las destruyan los anticuerpos del receptor. Pero las dificultades prácticas no han sido pocas y los pri-

meros éxitos parciales de este procedimiento se han obtenido después de veinte años de esfuerzos. Esto ilustra de nuevo el tiempo que puede ser necesario para pasar de un concepto innovador a su puesta en práctica. Uno de los obstáculos para el éxito de esta idea es la reacción inflamatoria que se desarrolla contra la microcápsula. Jean-Pierre Hallé (Universidad de Montreal), en colaboración con el Polytechnique Montreal, ha utilizado métodos de análisis físico-químico, incluyendo nanotecnologías, que le han permitido caracterizar la verdadera superficie de las microcápsulas a escala nanométrica.<sup>45</sup>

De este modo, junto a la medicina curativa clásica surge una medicina con la intención de regenerar parte de algunos de nuestros órganos o el órgano completo. Millares de personas se han beneficiado de que se haya retomado un programa de investigación europeo, el *Brite-Euram*, coordinado por la italiana FAB (Fidia Advanced Biopolymers). Esta empresa comercializó en 1998 el primer dispositivo de reconstrucción de tejidos a partir de un injerto de células procedentes del mismo paciente; de ahí la ausencia de rechazo. Las células de la dermis y de la epidermis crecen sobre una armadura tridimensional constituida por un polímero derivado del ácido hialurónico, un azúcar presente en nuestros tejidos. Esta armadura se decompone a medida que la piel se reconstituye. Desde 1999 el mismo principio se ha aplicado a la reparación de cartílagos de cinco mil personas. En 2007 FAB se ha asociado con la empresa belga TiGenix para desarrollar una aplicación ya operativa para reparar cartílagos de rodillas y tienen en proyecto la reconstitución de un seno después de una extirpación terapéutica.<sup>46</sup>

---

<sup>45</sup> DE VOX, Paul, ANDERSSON, A., TAM, Susan K., FAAS, Marijke M. y HALLÉ, Jean-Pierre. «Advances and Barriers in Mammalian Cell Encapsulation for Treatment of Diabetes». *Immunology, Endocrine & Metabolic Agents in Medicinal Chemistry*, n.º 6, 2006, pp. 139-153.

<sup>46</sup> Ver «De nouveaux matériaux pour soigner les plaies cutanées», en la siguiente página web: <http://ec.europa.eu/research/success/fr/ind/0360f.html>.

## DE LA IMAGEN MÉDICA A LOS MICROLABORATORIOS

Puesto que las nanopartículas magnéticas se pueden acumular en los tejidos enfermos, estas ayudan también a localizarlos aumentando el contraste en imágenes de resonancia magnética (IRM). Si se fijan nanocristales fluorescentes en los anticuerpos que son atraídos específicamente por ciertos virus o por células cancerosas, estos se podrían identificar y localizar rápidamente, siguiéndolos en el tiempo gracias a que la fluorescencia de las nanopartículas continúa meses después de la inyección. Se han podido distinguir células sanas de células con leucemia en el cuerpo de un paciente<sup>47</sup> y también se ha podido detectar una molécula individual en una célula viva. Investigadores académicos franceses<sup>48</sup> han conseguido seguir bajo el microscopio, por primera vez durante decenas de minutos, el desplazamiento de una proteína implicada en la transmisión de la señal nerviosa en las sinapsis, lo que puede ayudar a comprender los mecanismos de la memoria. «A más largo plazo —dicen estos investigadores— los nanocristales encontrarán, quizás, un papel como guías fluorescentes para los instrumentos de los cirujanos». De esta manera los cirujanos localizarían durante la operación, en tiempo real, diminutas metástasis para poderlas extirpar.

Las dificultades técnicas no deben menospreciarse. Ha hecho falta tratar los nanocristales para que no se agreguen, y hay que tener en cuenta la posible toxicidad del cadmio, que es un metal pesado. Este último problema desaparece cuando se incorporan colorantes fluorescentes a las nanopartículas de sílice que los protegen; de este modo se han identificado células leucémicas. Recubiertos de una lámina de silicio bio-

---

<sup>47</sup> HÉRINO, Roland y FAYOL, Romaric. *Combattre le cancer à l'aide des nanotechnologies: l'effort américain*. París: ADIT, rapport de l'ambassade de France aux États-Unis, 1 septembre 2007.

<sup>48</sup> Ver BROKMANN, Xavier, et al. *Op. cit.*

lógicamente compatible, los nanocristales se pueden mover con total seguridad dentro del cuerpo humano.

Reducir los tiempos de análisis y de identificación de peligros de todo tipo representa un reto mayor. En medicina, insiste Jean-Daniel Sraer, de la Academia francesa de medicina (Académie nationale de médecine), la rapidez de diagnóstico tiene un papel fundamental cuando se trata de determinar el tratamiento adecuado en una situación crítica como un infarto, o saber si una persona se ha contaminado accidentalmente o no con el VIH, y así evitar angustias y tratamientos preventivos injustificados. Lo ideal sería reducir los riesgos en tiempo real, para poder prevenirlos.

Las nanotecnologías ofrecen la posibilidad de hacer pruebas más sensibles y más rápidas. La tejana LabNow, de la que George Soros es accionista junto con muchas fundaciones caritativas, anunció en 2006 la inminencia de la fabricación de un aparato de prueba del sida «no más grande que una tostadora» y cuyo coste sería de 750 dólares USA: 100 veces menos que la instalación actual, que tiene el tamaño de un refrigerador. El diagnóstico se obtendría en diez minutos. Cualquiera que sea el resultado del proyecto, es representativo de las expectativas de los biochips. Desde los años 1990, los biochips permiten identificar muy rápidamente y sobre muestras muy pequeñas un gran número de genes (chips de ADN o ARN, *gene chips*) y de proteínas (chips de proteínas). Estos chips valen tanto para la identificación rápida de virus o bacterias que atacan a un enfermo, como para garantizar la trazabilidad de los productos alimentarios y, por ejemplo, el análisis bacteriano del aire y del agua.

Hay que destacar el desarrollo de dispositivos cada vez más rápidos, miniaturizados y económicos, los *microarrays*, microcircuitos que contienen un millón de sondas por centímetro cuadrado. Esta tecnología está empezando a producir microlaboratorios (microTAS o *micro total analysis systems*, o *labs-on-a-chip*) que caben en un chip y que, explotando la microfluídica, son capaces de realizar aná-

lisis biológicos completos en la cabecera del enfermo. Estos chips concentran sobre una placa de vidrio o de silicio las funciones que en estos momentos tiene un laboratorio biomédico en el que se hacen numerosos análisis diferentes. Representan una revolución en biotecnología, análoga a la vivida en electrónica con los microprocesadores que, a partir de 1971, integraron toda una serie de componentes que hasta entonces habían estado separados. El dominio de los biochips está fuertemente regentado por la industria americana, pero el CEA, que está desarrollando chips ultrasensibles para detectar la *legionella* u otras bacterias peligrosas, tiene su propia área de competencia, como varias pequeñas empresas francesas.

El CEA trabaja también en laboratorios sobre chips, área donde la franco-italiana STMicroelectronics dispone de gran capacidad. Philips inauguró en 2006 en Eindhoven un centro de investigación para laboratorios en chips. Una buena señal, apunta Jean Chabbal del CEA, porque Europa debe preservar su atractivo en esta materia; sus grandes empresas tendrán que desarrollar actividades de investigación a ambos lados del Atlántico. Se espera que entre 2012 y 2015 comiencen a despegar las aplicaciones comerciales. Por su lado, las grandes empresas asiáticas como Canon, Toshiba, Samsung, LG se lanzan a esta área explotando su dominio de las tecnologías de electrónica miniaturizadas.

## **COMO UNA MARIPOSA ENAMORADA**

Una de las ambiciones de las nanotecnologías es emular el rendimiento/comportamiento de las mariposas. Un lepidóptero nocturno macho detecta hormonas femeninas con una sensibilidad cien billones de veces mayor que la de las «narices electrónicas». Para ello utiliza receptores, moléculas complementarias de la molécula que tiene que reconocer. «Nosotros queremos, como él, jugar con la relación entre el receptor y la molécula objetivo», explica Mar-

co Tartagni, de la Universidad de Bolonia, coordinador del proyecto europeo Receptronics, que reúne investigadores italianos, británicos, franceses y griegos.<sup>49</sup> El LETI (Laboratoire d'électronique et de technologies de l'information, CEA) prepara un dispositivo donde los receptores (proteínas), elaborados por ingeniería genética, se incluyen en una capa nanométrica de lípidos sobre una membrana de silicio perforado con poros de 230 nm. La señal eléctrica emitida por el receptor al contacto de una molécula objetivo se procesa con un chip de silicio.

«Hacia 2010, habremos multiplicado por 100 o 1000 las sensibilidades de las narices actuales», anuncia Marco Tartagni, «deberíamos poder identificar una célula en un billón». Esto permitiría un test de embarazo con una gota de sangre a partir de las pocas células fetales que contiene, evitando la extracción invasiva necesaria para la amniocentesis. Se espera poder detectar desórdenes hormonales que avisan de la formación de un cáncer y de otras enfermedades antes de que se desencadenen, y también verificar el estado de conservación de alimentos o detectar explosivos. Spi-Bio (grupo Bertin) debe validar el futuro kit de diagnóstico. Otro socio del programa europeo es una *start-up* creada en Bolonia por investigadores en 2004: Silicon Biosystems S.p.A., que desarrolla microlaboratorios para diagnóstico.

Todos estos desarrollos prometen, como anuncia Jean Chabbal, director de departamento de LETI, una medicina más preventiva, menos invasiva y más personalizada. «Será posible identificar el tipo de patología, determinar el tratamiento adecuado y hacer el seguimiento de la respuesta a este tratamiento».<sup>50</sup>

---

<sup>49</sup> «Una nariz bioelectrónica para detectar las enfermedades» *Cordis Nouvelles*, 20 septiembre 2006, Bruselas.

<sup>50</sup> CHABBAL, Jean. *Información de Sylvie Mauris-Demourieux, Millénaire3*, 14 marzo 2007. Página web: [www.millenaire3.com/uploads/tx\\_ressm3/Jean\\_Chabbal.pdf](http://www.millenaire3.com/uploads/tx_ressm3/Jean_Chabbal.pdf).

# 4

## UNA MICROINFORMÁTICA RENOVADA

### ORDENADORES MÁS CÓMODOS

El fin del decenio verá sin duda la difusión de ordenadores en red, fijos o portátiles claramente menos caros, más potentes y sobre todo más cómodos; mejor adaptados a las necesidades de los que no son informáticos. Evoluciones que anuncian tanto los teléfonos multifunción de alta gama del tipo Blackberry como los ordenadores de bajo precio introducidos en el mercado como reacción a la iniciativa One Laptop Per Child de Nicholas Negroponte.

Las nanotecnologías contribuyen de diferentes modos a esta evolución. Es trivial constatar que la finura de los circuitos integrados es nanométrica (capítulo 2) y que las memorias *flash*, que intentan reemplazar a los discos duros frágiles para las aplicaciones «nómadas» (ordenadores portátiles, lectores MP3, cámaras digitales...), contienen láminas nanométricas y explotan el efecto túnel. Pero las memorias flash tienen un competidor, basado en la magnetorresistencia de uniones túnel magnéticas (ver capítulo II): pronto será posible encender el ordenador y encontrar los ficheros abiertos anteriormente en la oficina y retomar el trabajo donde lo habíamos dejado. Esto será posible gracias a las MRAM (*Magnetic Random Access Memories*), explica Bernard Dieny, director de



Spintec.<sup>51</sup> Los documentos quedarán salvados en el caso de un corte imprevisto de corriente.

A la no volatilidad de las memorias flash y con un menor consumo eléctrico, las MRAM añaden las ventajas en velocidad de lectura y escritura y en densidad de información de los otros dos tipos de memoria,<sup>52</sup> con una longevidad superior. Freescale fue el primero en comercializar en 2006 esta memoria que se pretendía universal, pero el precio era todavía demasiado alto para una gran difusión global. La empresa de Grenoble Crocus Technology, creada para explotar las patentes de Spintec, previó introducirla en el mercado a finales de 2008.<sup>53</sup>

Como el volumen de datos almacenados por las organizaciones aumenta casi un 50% cada año y dado que las aplicaciones personales desde fotos a vídeos necesitan cada vez más memoria, se va a asistir a una fuerte competición entre las soluciones. De este modo IBM lleva anunciando desde 2003 la próxima salida de su milpiés, el Millipede, que es una buena ilustración de cómo podrían ser los «microsistemas electromecánicos» del futuro, los MEMS (*micro-electro-mechanical systems*). Se trata de una memoria capaz de almacenar el equivalente al contenido de 25 DVD sobre la superficie de un sello de correos; es decir, una densidad de información de 19 mil millones de bytes por centímetro cuadrado. El prototipo contiene una redícula de 4096 «patas» que graban los datos que se quieren memorizar haciendo agujeros de algunos nanómetros en una base polimérica. Los agujeros, que se pueden cerrar recalentándolos, si se quieren borrar los datos escri-

---

<sup>51</sup> Spintec (*Spin in Electronics*) es un laboratorio común al CEA y al CNRS que tiene su base en Grenoble.

<sup>52</sup> SRAM (*Static Random Access Memory*), memoria estática viva y, por lo tanto, volátil, a la que se puede acceder muy rápidamente, pero que consume mucha electricidad; y DRAM (*Dynamic Random Access Memory*), dinámica, que necesita que la actualicen pero que es barata.

<sup>53</sup> MUSI, Gilles. «Crocus Technology veut détrôner les memoires flash». *L'Expansion.com*, 6 abril 2007.

tos, representan los «1» y las ausencias de agujero representan los «0», como en una tarjeta perforada. IBM quiere utilizarlos para almacenar datos de cámaras, PDA, *walkmans* y otros aparatos móviles. La compañía americana Nanochip Inc. tiene un proyecto parecido, mientras Nanterro Inc. y ZettaCore Inc. están estudiando memorias basadas en nanotubos de carbono o en moléculas biológicas (proteínas o DNA), aunque su posible comercialización está aún lejos.

Pasando a los microprocesadores, se ha logrado realizar transistores constituidos por un nanotubo de carbono (ver capítulo 2). Otros tipos de transistores de electrón único (SET) son objeto de estudios muy avanzados, sobre todo en los laboratorios industriales japoneses.<sup>54</sup> Incluso en este tema pasará tiempo antes de que se produzcan a escala industrial, partiendo de estos minúsculos transistores, circuitos integrados lógicos o memorias muy densas y muy rápidas. Una de las dificultades técnicas es la organización de nanotubos —que generalmente se depositan en desorden— sobre el sustrato de silicio. El CEA ha conseguido obtener una deposición uniforme y ordenada de nanotubos; acaban de desarrollar, con el Instituto de Electrónica, de Microelectrónica y de Nanotecnología (IEMN), transistores con la frecuencia récord de 30GHz (30 mil millones de ciclos por segundo),<sup>55</sup> o sea, casi diez veces la frecuencia de los procesadores actuales.<sup>56</sup>

A medio plazo se espera poder disponer de transistores basados, si no en moléculas biológicas, al menos en polímeros. Gracias a estos, como hemos visto, se podrían obtener ordenadores eficaces y más económicos, al contrario

---

<sup>54</sup> CAPRAIS, Nicolas (junio 2004), *Les Nanotechnologies au Japon en 2004*. París: ADIT informe de la embajada de Francia en Tokio.

<sup>55</sup> «Transistors à base de nanotubes de carbone...de plus en plus rapides» Página web del CEA, [www.cea.fr/le\\_cea/actualites/transistors\\_a\\_base\\_de\\_nanotubes\\_de\\_carbone](http://www.cea.fr/le_cea/actualites/transistors_a_base_de_nanotubes_de_carbone), 27 junio 2007.

<sup>56</sup> El rendimiento que el usuario obtiene de estos ordenadores no aumenta necesariamente en la misma proporción, porque la frecuencia del procesador es sólo uno de los parámetros que influye en el rendimiento global.

que los ordenadores actuales, que son cada vez más potentes pero caros, y en los que una parte de la potencia sirve de poco al usuario. De hecho, las materias primas y los procesos serían mucho más baratos que en la electrónica del silicio; y, por otro lado, aparecerían nuevos actores, como en cada generación tecnológica, lo que ampliaría la competencia, por lo menos al principio.

## **PANTALLAS DE MENOR CONSUMO**

La convergencia y la interpenetración creciente de la televisión, de lo audiovisual y de la electrónica portátil hacen aparecer por todas partes pantallas planas, gigantes o minúsculas, incluso flexibles. Las pantallas del teléfono móvil Motofone F3 de Motorola y los libros electrónicos<sup>57</sup> explotan la tinta llamada electrónica. Las partículas nanométricas incorporadas en una hoja de polímero se orientan bajo el efecto de un campo eléctrico, haciendo aparecer una imagen o un texto con un contraste igual al del papel impreso, que permite la lectura incluso a pleno sol. El consumo eléctrico es muy reducido porque la imagen permanece con la alimentación cortada. Se están probando paneles anunciantes modificables a distancia, basados en este principio.

Aunque estas pantallas no están todavía adaptadas a las imágenes móviles de vídeo, esto no ocurre con las que están hechas con diodos OLED, una aplicación de polímeros conductores. En 2007 se vendieron unos 150 millones de estas pantallas, el doble que el año anterior. Producidas por la coreana Samsung, la taiwanesa RiTdisplay y otras cuatro empresas asiáticas, aún tienen un tamaño pequeño, reservado a los teléfonos y otros terminales portáti-

---

<sup>57</sup> Estos microordenadores que imitan en su pantalla un libro de bolsillo permiten almacenar y leer cientos de obras con un contraste comparable al de los textos impresos en papel. Los comercializan Philips, Sony, Amazon, el francés Bokeen y otras empresas, sobre todo chinas.

les. Sony empezó una pequeña y costosa producción comercial para el mercado japonés en formato de 11 pulgadas al final de 2007,<sup>58</sup> adelantándose a Samsung, Panasonic y Toshiba (esta última empresa decía esperar hasta 2010), pero todavía no se prevé que haya más de un millón de televisores OLED en 2011, sobre un total de 240 millones de ventas. El OLED quiere reemplazar las pantallas de cristales líquidos LCE (*Liquid Crystal Display*) y de plasma, con ventajas atractivas: un ángulo de visión mayor, mejor reproducción de colores, un contraste sin igual, un consumo eléctrico cuatro veces menor, gracias a la eliminación de la retroiluminación indispensable para los LCD, y un grosor y un peso inferiores. Pero al tener un precio muy superior y una vida útil del orden de 10.000 horas nada más, las desventajas son aún considerables. Esto explica por qué es tan lenta la industrialización de una solución, que tiene otros competidores, en los nanotubos de carbono, también candidatos a la fabricación de pantallas de muy alta definición, eventualmente flexibles y táctiles. El CEA ha desarrollado una técnica que permite producir nanotubos sobre el sustrato del cátodo, directamente allí donde deben funcionar en la futura pantalla. Samsung tiene interés en este tema después de haber explorado durante muchos años otra vía. El CEA ha fabricado con esta tecnología uno de los primeros prototipos del mundo de pantalla plana de nanotubos, de 6 pulgadas (diagonal), con rendimientos de vídeo mejores que las pantallas LCD. Las pantallas de nanotubos consumirían menos energía porque no necesitan más electricidad que la indispensable para mostrar las partes claras de cada imagen, mientras que toda la superficie de los LCD está constantemente iluminada, apareciendo la imagen por máscara. Se puede también contemplar la utilización de nanotubos para proveer con menor consumo de energía la

---

<sup>58</sup> GONSALVES, Antone. «Sony Plans to Release OLED TV Display in December». *InformationWeek*, 1 octubre 2007.

retroalimentación de pantallas de cristal líquido, mejorando sus prestaciones dinámicas. En esta competición de tecnologías, el problema, a partir de ahora, no es tanto técnico cuanto industrial y financiero. Los grandes campeones europeos se han apartado de la producción de televisores y de pantallas.<sup>59</sup>

---

<sup>59</sup> La parte de mano de obra es relativamente baja en el coste de las pantallas. Su producción es por tanto posible en Europa, pero este mercado ofrece márgenes reducidos que no atraen a la mayoría de los financieros occidentales. Los financieros asiáticos e indios, sin embargo, sí los encuentran atractivos.

# 5

## DE LA ECOLOGÍA A LA VIDA COTIDIANA

### ENERGÍA Y ECOLOGÍA

El ahorro de energía<sup>60</sup> que comportarían las mejoras de las pantallas de televisión no es marginal: un ahorro de 100 vatios no impresiona, pero sobre 100 millones de nuevos televisores y un parque de casi mil millones en todo el mundo, sí importa. Unas pantallas de televisores y de ordenadores más baratas podrían reducir el consumo mundial, por lo menos, en unos 100 gigavatios, que es equivalente a la generación de otros tantos reactores nucleares. De un modo más general, en los EE. UU. la informática representa ya un 10% del consumo eléctrico anual. Esto justifica los grandes esfuerzos que se están haciendo para reducir el consumo de estos aparatos. Los libros electrónicos no van a eliminar el caro libro de papel, al que debemos nuestros progresos materiales y el desarrollo de la democracia. Pero, dejando a un lado su bajo consumo eléctrico, podrían ser interesantes porque evitarían la tala de millones de árboles al reducir la demanda de papel: en China hay planes para utilizarlos como mochilas digitales para los escolares o como bibliotecas portátiles.

---

<sup>60</sup> SUTTER, Ulrich y LOEFLER, Jonathan. *Roadmap Report Concerning the Use of Nanomaterials in the Energy Sector*, Karlsruhe: Steinbeis-Europa-Zentrum, marzo 2006.

La iluminación consume más de 2.600 teravatios/hora de energía al año, un 18% de la producción mundial de electricidad. Se espera reducir este gasto de energía reemplazando progresivamente las lámparas actuales por diodos electroluminiscentes, LED en inglés. Estos, especialmente ahorradores de electricidad, no emiten más que ciertos colores en el espectro visible: rojo, azul o verde. Para obtener la luz blanca se pueden combinar estas emisiones o excitar materiales fluorescentes con un diodo azul o ultravioleta. Los nanocristales semiconductores mejorarían el rendimiento de los LED y superarían una de sus limitaciones: Myriam Protière del CEA explica que, al jugar con el tamaño, se determina la longitud de onda emitida, y una combinación de tres tipos de nanocristales puede emitir luz blanca. Otra vía prometedora consiste en utilizar OLED, diodos orgánicos. Los progresos realizados permiten esperar que sean más eficaces no sólo que las lámparas halógenas o incandescentes, sino también que los tubos fluorescentes de luz blanca (este es ya el caso con luz verde). Los OLED tendrían que ser menos caros de producir y abrir la vía a nuevas aplicaciones, como la de fuentes de luz en placas flexibles de gran tamaño.<sup>61</sup> Las redes de distribución eléctrica pierden parte de la corriente transportada fundamentalmente a causa de la resistencia de los hilos de cobre, y estas pérdidas han pasado del 5% en 1970 al 9,5% en 2001 debido al aumento del tráfico.<sup>62</sup> Esto equivale en el mundo a dos tercios de la producción francesa de electricidad (559 teravatios hora en 2002).<sup>63</sup> Si se pudieran reemplazar los cables de cobre por materiales superconductores con resistencia eléctrica nula, el problema se habría resuelto. Mientras tanto se ponen grandes esperan-

---

<sup>61</sup> CHESNAIS, Sébastien. «Les OLEDs. Des nouvelles sources de lumière». *Les journées de l'optique*. Giens, 9 octubre 2007.

<sup>62</sup> SCHMIDT, Howard. *Developing the QuantumWire*, en HÉRINO, Roland y DELVILLE, Rémi. Informe en el fórum «Énergie et nanotechnologie: stockage et distribution». 13 marzo 2006, ADIT (embajada de Francia en los EE. UU.).

<sup>63</sup> STRINGER, John, *The Challenge for the Grid of the 21st Century*. En HÉRINO, Roland y DELVILLE, Rémi. *Id.*

zas en la fabricación de cables de nanotubos de carbono, que conducen la energía mucho mejor que el cobre. La NASA (National Aeronautics Space Agency) financió a Rice University (EE. UU.) para que fabricara un cable de nanotubos de un metro de longitud antes del año 2008.

## **PRODUCCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA**

Hay muchas investigaciones en marcha dedicadas a sacar un mayor partido de las propiedades de los nanomateriales y de las nanopartículas, para aprovechar sobre todo su mayor reactividad, debido a su alta superficie específica. Esto permitiría desarrollar baterías, condensadores, pilas de combustibles y paneles solares más eficientes. Los problemas están por supuesto relacionados: si se puede almacenar mejor la energía, se facilita la utilización de la energía solar y la eólica, que son fuentes de energía renovable pero intermitente.

En Francia se han reagrupado los recursos en esta área, especialmente en LITEN (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et des nanomatériaux, CEA), con casi trescientos investigadores y empleados, y en INES, el nuevo Institut national pour l'énergie solaire, que se creó en Chambéry por el CEA, el CNRS y algunas universidades, con el apoyo de la región de Rhône-Alpes y la de Saboya. La impresión de Hélène Burlet, de LITEN, es que las pilas de combustible que consumen hidrógeno para dar electricidad no van a despegar antes de dos o tres décadas, en especial en su aplicación en los coches. Mientras tanto se utilizarán otras soluciones que presentarán menos problemas, porque, por mucho que el uso de hidrógeno pueda ser atractivo, hace falta almacenarlo y sobre todo producirlo, y para esto se necesita mucha energía. Además las pilas de combustible actuales utilizan platino como catalizador, un metal muy caro que proviene en su mayor parte de un solo país (Sudáfrica), cuya produc-



ción no sería suficiente para cubrir el parque automovilístico mundial. Se intenta mejorar los rendimientos de las baterías de iones de litio, producidas casi en su totalidad en Japón, China y Corea del Sur, y reducir a varios minutos el tiempo que se necesita para recargarlas, una hora en lugar de cuatro. Esto sería importante para los vehículos eléctricos, aunque la vida de estas pilas es demasiado corta, lo que está siendo también objeto de estudio.

Según Philippe Malbranche, del CEA, los edificios nuevos del año 2030 estarán equipados con paneles fotovoltaicos, que suministrarán energía para los usos residenciales y terciarios e incluso para puntos de recarga de vehículos eléctricos o híbridos. En Francia se está trabajando no solo para conseguir rendimientos máximos en la producción de energía solar, sino también costes razonables. Para ello se está tratando de reducir la cantidad de silicio necesario (20 gramos por vatio hace veinte años, la mitad en la actualidad) y reducir el precio de este caro material, haciendo aceptable el uso de silicio menos puro. También se está intentando elevar la eficacia aumentando la superficie específica. De ahí que se estén estudiando las superficies nanoestructuradas o nanohilos de silicio que se agrupan en «alfombras». En esta área se producen novedades mundiales continuamente, pero se evita a menudo aclarar que el precio que hay que pagar por estos altos niveles de rendimiento es el de tener solo unas horas de vida. Por lo tanto habrá que seguir mejorando los desarrollos en los próximos años, explorando los polímeros orgánicos como hacen las empresas americanas Nanosolar y Konarka con fondos militares. Estas investigaciones podrían dar lugar a soluciones baratas, pero hay que ser cautos ante informes de éxito prematuro.

## **EN LA VIDA DIARIA**

Hay otros materiales cuyas propiedades han mejorado gracias a las nanotecnologías y que están entrando en nuestra

vida diaria. Babolat comercializa raquetas de tenis reforzadas con nanotubos de carbono de la empresa francesa Nanoleedge. Wilson dice que ha doblado la vida media de sus pelotas de tenis gracias a que han añadido un poco de arcilla nanométrica en sus núcleos de caucho. La incorporación de nanopartículas de arcilla en polímeros ofrece tres ventajas importantes, como dice Giovanni Camino, del Politecnico di Torino y coordinador del programa europeo Nanofire: el efecto barrera de las películas de material plástico para el embalaje alimentario, las propiedades ignífugas y la conductividad térmica y eléctrica. La gran dificultad reside en la obtención de una dispersión muy fina y homogénea de las nanopartículas en la matriz de polímero. De aquí a cinco años, predice el profesor de Turín, los nanotubos de carbono, cuyo precio habrá bajado, se encontrarán en muchas aplicaciones. Este será también el caso de la arcilla, que es más conocida, y también el de nuevas cargas más fáciles de dispersar que están apareciendo, como la sepiolita (silicato de magnesio) producida por la española Tolsa, o el hidróxido de aluminio. La suiza Kabelwerke Brugg utiliza toneladas de hidróxido de aluminio para limitar la inflamabilidad de los cables que produce.

La resistencia al fuego es la base de otro programa europeo: el *Predfire-Nano*.<sup>64</sup> El director del programa, Serge Bourbigot, de la École nationale supérieure de chimie de Lille, explica que las nanocargas de arcilla dan a menudo mejores resultados contra el fuego si se utilizan en sinergia con los retardadores habituales, de los que son necesarias dosis más pequeñas. Esto permite preservar las propiedades de los materiales de base, con mejores resultados mecánicos. Los materiales compuestos modificados con nanopartículas se pueden fundir, hilar y, posteriormente, tejer. Este es el procedimiento que se utiliza en Francia y Bélgica para fabricar tejidos que se vuelven antibacterianos gra-

---

<sup>64</sup> *Predicting Fire Behaviour of Nanocomposites from Intrinsic Properties*, página web [www.engi.ulst.ac.uk/predfire](http://www.engi.ulst.ac.uk/predfire).

cias a la presencia de plata. Es de esperar que se multipliquen los tejidos con valor añadido: tejidos antimanchas con partículas de óxido de silicio o dendrímeros, tejidos que protejan de golpes de calor gracias a nanopartículas de óxido de titanio.

La industria aeroespacial está claramente interesada en las reducciones de peso que ofrecen los nanocomposites, así como en el efecto anticombustión de las nanoarcillas. La industria del automóvil tiene los mismos intereses con la necesidad añadida de incurrir en costes mucho menores. Esta industria es la que obligará a los nanomateriales a progresar más rápidamente en la relación coste/rendimiento y en la facilidad de industrialización. Toyota es pionera en su aplicación en piezas estructurales. General Motors incluye desde 2002 cubiertas de escalones de termoplástico reforzado con arcilla<sup>65</sup> en sus modelos de serie; para ello colabora desde hace tiempo con la filial americana de la europea Montedison Shell. Las superficies hechas de vidrio en los automóviles, que tienden a aumentar, podrían ser autolimpiables, aislantes, antilluvia, antirreflecentes... Renault trabaja con otras compañías para reemplazar el vidrio por policarbonato, más ligero, que se vuelve resistente al rayado gracias a la adición de nanopartículas. Mercedes anunció, a finales de 2003, que era la primera empresa que comercializaba coches de serie con pinturas con nanoarcillas, cuya resistencia al rayado es un 40% mejor que las convencionales. Michelin estudia la introducción de nanocargas en sus neumáticos para limitar el desgaste y el ruido. La reducción de la permeabilidad de los polímeros por la adición de arcillas es de interés en la fabricación de neumáticos y depósitos de gasolina. Fiat explota el hecho de que 0,5% de nanotubos son suficientes para que las conducciones de llegada de gasolina al depósito, que son de poliamida, se vuelvan conductoras,

---

<sup>65</sup> VERGER, Ludovic, «Les nanocomposites aux États-Unis, vers une émergence des premières applications». *Op. cit.*

protegiéndolas así frente a las descargas electrostáticas. Los amortiguadores de algunos coches, sobre todo de los Audi, utilizan una propiedad de las nanopartículas de cobalto en suspensión en un líquido: un campo magnético débil controlado por el ordenador de a bordo hace que el fluido se vuelva muy viscoso de forma instantánea, lo que permite absorber en tiempo real los choques y reducir de un modo activo las vibraciones del vehículo.

Esto da idea sin duda de la posibilidad de desarrollo en muchas áreas de otras aplicaciones de materiales llamados «inteligentes», de sistemas interactivos. Así, la aeronáutica podría controlar las microfisuras que aparecen en una pieza de plástico hecha conductora mediante una pequeña cantidad de nanotubos de carbono. El paso de la corriente eléctrica permitiría soldar las fisuras y restablecer el 70% de la resistencia inicial de la pieza.<sup>66</sup>

Las estructuras de este tipo que se reparan a sí mismas, o por lo menos que previenen el riesgo de fallo, podrían encontrar aplicaciones en muchos sectores como, por ejemplo, el de la construcción. Italcementi comercializa cementos autolimpiables y descontaminantes: el óxido de titanio se comporta como catalizador para amplificar la descomposición de óxidos de nitrógeno por los rayos ultravioleta del sol. Eurovia (grupo Vinci) propone un concentrado del mismo tipo para fabricar calzadas en el centro de las ciudades que tienen altos niveles de polución por los gases de los tubos de escape de los coches. Se podría pensar que en el futuro habrá edificios que explotarán la energía del sol gracias a sus tejados cubiertos de células fotovoltaicas dopadas con nanopartículas y que sus fachadas cercanas a las zonas por las que circulan automóviles podrían descontaminar parcialmente el aire. ¿Se podrían aislar con aerogeles de sílice nanoporosa las barreras térmicas más

---

<sup>66</sup> FAYOL, Romaric. «Des nanotubes pour détecter et réparer les fissures dans les ailes d'avion». *Bulletin électronique États-Unis*, n.º 95, 15 octobre 2007. ADIT.

eficaces del mercado? Hará falta que baje considerablemente el precio de estas espumas translúcidas de partículas de algunos nanómetros que absorben asimismo los ruidos. La empresa americana Aspen las suministra a la industria y a la construcción, y está desarrollando sacos de dormir y zapatos para condiciones extremas.

Otras aplicaciones están aún más cerca de nuestra vida diaria. La industria agroalimentaria estudia activamente la explotación de nanotecnologías para mejorar los embalajes y controlar la conservación de alimentos.<sup>67</sup> Las técnicas utilizadas en el sector de la salud también podrían utilizarse para controlar los parásitos de plantas y animales. Así, por ejemplo, la Clemson University (Carolina del Sur) está desarrollando nanopartículas capaces de eliminar una bacteria, el *Campylobacter*, que infecta a las aves sin afectarlas, pero que provoca diarreas a un millón de americanos cada año.<sup>68</sup> Esto suscita, naturalmente, la cuestión de la inocuidad de todas estas prácticas.

---

<sup>67</sup> KUZMA, Jennifer y VERHAGE Peter. *Nanotechnology in Agriculture and Food Production: Anticipated Applications*. Washington DC PEN Project in Emerging Nanotechnologies], 4 septiembre 2006.

<sup>68</sup> TZENG, Jeremy. «Food Safety Interventions: Adhesion-Specific Nanoparticles for Removal of Foodborne Pathogens» International Food Nanotechnology Conference, 1 agosto 2007. Institute of Food Technologists.



## **PRECAUCIONES Y ACCIONES**

La cuestión central que se plantea con la aparición de toda nueva técnica es la evaluación de los riesgos que comporta su explotación, las ventajas para la economía y, sobre todo, los beneficios que proporcionará a la humanidad. La opinión pública tiende a no diferenciar la modificación genética de los escándalos del amianto. El discurso de algunos promotores de nanotecnología americanos, muy influenciados por los delirios transhumanistas con vistas a mejorar la especie humana a golpe de técnica, son ciertamente inquietantes...<sup>69</sup> Pero si hubiera que rechazar los trabajos de todos los científicos que fueron delirantes de un modo a veces criminal fuera de su campo de competencia, se habrían perdido las contribuciones de Linneo, Buffon, Kant o los premios Nobel de física, como William Schockley, uno de los inventores del transistor, y de medicina, James Watson, codescubridor del ADN, todos los cuales apoyaban el racismo.<sup>70</sup> Bien se sabe en prospectiva que no se debe juzgar el mensaje en función de las cualidades o debilidades del mensajero.

Pierre Papon resume la situación: «Si los escenarios que contemplan la posibilidad de que las nanomáquinas (supo-

<sup>69</sup> DUPUY, Jean-Pierre. «Quand les technologies convergeront». *Futuribles* n.º 300, septiembre 2004, pp. 5-18.

<sup>70</sup> Ver sobre todo GIROD, Michel. *Penser le racisme. De la responsabilité des scientifiques*. París: Calmann-Lévy, 2004.

niendo que se puedan construir) puedan autorreproducirse y escapar a todo control son pura ciencia-ficción, tendríamos en cambio que preguntarnos acerca de la toxicidad potencial de algunos nanomateriales». <sup>71</sup>

Para aumentar la confusión resulta que a veces ya no sabemos de qué se habla cuando se mencionan las nanotecnologías, debido al carácter fuera de lo común de este campo multidisciplinar, como se ha podido constatar. Como escribe Étienne Klein, <sup>72</sup> este campo no está definido más que por su escala nanométrica y no tiene más coherencia que un «inventario a la Prévert». Por lo tanto, no hay una nanociencia o una nanotecnología, y los profanos mal informados asocian nanotecnologías y nanopartículas. Pero, como se ha visto, esto es muy restrictivo: ¿se han de prohibir los circuitos integrados, los lectores de disco duro y todos los materiales nanoestructurados, incluyendo las alas de mariposa? Las nanopartículas presentan efectivamente problemas en la medida en la que no están encerradas dentro de una matriz como lo están los polvos de oro que colorean nuestros vidrios, o cuando se corre el riesgo de que se escapen por desgaste o destrucción de esta matriz. Todo esto que se acaba de decir sobre las propiedades poco comunes de los materiales divididos muy finamente, sobre su reactividad excepcional, sobre las posibilidades que esto abre —sobre todo en medicina— da pie a que nos hagamos la pregunta evidente sobre sus posibles efectos dañinos. Repitamos que no hay que sentirse más seguro porque las nanopartículas hayan existido desde siempre en nuestro ambiente, ni porque hayamos descubierto que los nanotubos de carbono y los fullerenos están presentes en el aire contaminado de nuestras ciudades desde hace tiempo. De hecho, no se conocen bien los mecanismos precisos de los daños que la polución urbana causa en el hombre, y el desarrollo de las nanociencias podría ofrecer

<sup>71</sup> PAPON, Pierre. «Les nanotechnologies: quels risques?» *Futuribles* n.º 329, abril 2007, pp. 67-69.

<sup>72</sup> KLEIN, Étienne, GRINBAUM, Alexei y BONTEMS, Vincent. *Op. cit.*, p. 4.

la posibilidad de aclarar estas causalidades para una prevención más eficaz.

El INRS, el Institut national de recherche et de sécurité, que está orientado principalmente hacia la higiene y la seguridad en el trabajo, ha publicado<sup>73</sup> en un «consejo de expertos» una reflexión colectiva de 16 especialistas sobre lo que se puede decir razonablemente sobre los riesgos que han introducido las nanopartículas. En vista de la investigación llevada a cabo en todo el mundo, es obligado concluir que nuestros conocimientos son aún muy insuficientes y controvertidos, y que no se concede suficiente crédito a esta área —por ejemplo, menos del 4% del total de los fondos públicos americanos se dedica a las nanotecnologías—. Se han de tomar en cuenta muchos factores, tales como la naturaleza química, el tamaño, la forma geométrica, la estructura cristalina de las partículas, lo cual dificulta los estudios. Por otro lado, está claro que no se pueden considerar las nanopartículas en general y que es necesario estudiar sus riesgos caso por caso.

Las primeras preguntas están relacionadas con la capacidad de las nanopartículas para penetrar en nuestro organismo, sobre todo por las vías respiratorias y la boca. Parece que su acumulación en los pulmones es mayor cuando se realiza un esfuerzo físico, lo que quiere decir que los obreros están más expuestos que el resto de trabajadores. «El paso de ciertas partículas ultrafinas por las fosas nasales hasta el cerebro se debe considerar como un caso probable», apuntan los expertos. El hecho se ha comprobado con partículas de oro. Sin embargo, queda por establecer si esta intrusión, a priori inquietante, tiene algún efecto sobre la salud. Las nanopartículas de óxido de titanio que se utilizan en las cremas protectoras del sol no deberían pasar a través de la piel sana, pero ¿qué ocurre en una piel normal, es decir una piel con microfisuras? Las precauciones son necesarias sobre todo para los trabajadores

---

<sup>73</sup> HERVÉ-BAZIN, Benoît (bajo la dirección de). *Les Nanoparticules*. Op. cit.



expuestos a nanopartículas, que deben en muchos casos llevar máscaras completas y verificar la eficacia de los trajes de protección disponibles en el mercado.<sup>74</sup>

El grupo de trabajo del INRS recomienda que en las normas se considere las nanopartículas como sustancias nuevas diferentes de las micropartículas de la misma especie química. El INRS exige la máxima transparencia sobre la caracterización de productos industriales, así como la aplicación estricta de las normas que ya existen para los vapores de soldadura, el negro de carbono y otras partículas que se vienen utilizando desde hace tiempo. Para las otras, en ausencia de datos más científicos, recomienda aplicar un coeficiente de seguridad correspondiente al cociente entre las superficies específicas de micropartículas y nanopartículas de la misma sustancia a los valores máximos de exposición profesional que existen para micropartículas.

Está claro que hace falta ampliar considerablemente la investigación sobre los efectos de las nanopartículas<sup>75</sup> y también sobre su caracterización. Sin embargo, «lo que se conoce de los riesgos para la salud humana a partir de esta experiencia limitada no da pie a tener razón para demonizarlas en su conjunto, incluso si es necesario mantener la vigilancia». Yo añadiría que esta conclusión del trabajo del INRS supone que los estados son capaces de hacer respetar los planes y reglas nacionales e internacionales, y que los aplican contra intereses particulares y abusos mafiosos. Sin un estado de derecho, toda tecnología se vuelve eminentemente peligrosa. Esto no es específico de las nanotecnologías. Su explotación está limitada por los mismos factores culturales que retrasan la de las biotec-

---

<sup>74</sup> GOLANSKI, Luana, GUIOT, Arnaud y TARDIF, François. *NanoSafe. Are Conventional Protective Devices such as Fibrous Filter Media, Respirator Cartridges, Protective Clothing and Gloves also Efficient for Nanoaerosols?* Grenoble: CEA, 2008.

<sup>75</sup> Se puede encontrar un resumen de las investigaciones europeas en curso en el informe AGUAR, Pilar y MURCIA NICOLÁS, José Juan. *EU Nanotechnology R&D in the Field of Health and Environmental Impact of Nanoparticles*. Bruselas; Comisión Europea (Cordis), 28 enero 2008.

nologías. En ambos casos, la mediocre cultura científica y técnica, no sólo del público sino también de los que toman las decisiones y de los científicos,<sup>76</sup> da lugar a pensar que lo «nuevo», lo que es inherente a todo proceso de innovación, suscita temores o entusiasmos fuera de lugar.

## LO QUE ESTÁ EN JUEGO Y ACCIONES

En estas condiciones, ¿va a ser posible que se cumplan las perspectivas prometedoras que hemos estado revisando, sobre todo en el caso de la salud y de las energías renovables? Un punto importante es disponer de los materiales de base necesarios en cantidades industriales. La producción de nanotubos de carbono, que desde hace tiempo eran casi exclusivos de los americanos con la oferta de Hyperion Catalysis, se enfrenta ya a una competencia estimulante. La francesa Arkema-Total ha desarrollado en 2006 una capacidad de producción de 10 toneladas por año, que le permite suministrar lotes homogéneos a 300 sociedades americanas, europeas y asiáticas. El mismo año, el grupo alemán Bayer se ha lanzado al mercado de los nanotubos como la canadiense Raymor. En 2006 también Nanocyl, una joven *start-up* belga, ha abierto una línea de producción de 15 kg por día. Fortalecida por sus colaboraciones con todas las universidades valonas y los investigadores de Roubaix, esta pequeña empresa —que confía en sus accionistas— tiene como objetivo jugar un papel líder a nivel internacional y afirma tener los mejores productos intermedios (*semi-finished*) del mundo para aplicaciones donde los nanotubos permiten una conductividad eléctrica elevada. Otra joven empresa creada en 1999 en Francia, Nanoledge, ha pasado de la fabricación de nanotubos al suministro de prototipos, aprovechándose de su

---

<sup>76</sup> LÉVY-LEBLOND, Jean-Marc. *La Science en mal de culture/Science in Want of Culture*. París: Futuribles (Perspectives), 2004.

dominio clave de la dispersión homogénea de los nanotubos en plásticos. Nanoledge ha decidido recientemente hacer del deporte su principal línea de desarrollo.

Todo esto muestra una sana efervescencia en Europa de algunos grandes grupos y de muchas pequeñas empresas. En lo que se refiere al esfuerzo público de investigación, en alza por doquier, se reparte de un modo bastante equilibrado<sup>77</sup> entre América del Norte, Asia y Europa. Este último continente, que invierte ahora el 28% del total mundial, compite con los otros dos, que están al mismo nivel con poco más de mil millones de dólares en 2006: un 35% del total cada uno. Sin embargo, las posiciones son muy diferentes si se incluyen los esfuerzos de las empresas, que invierten casi dos veces más que el sector público en los Estados Unidos y tres veces más en Japón. Corea del Sur y Taiwán tienen programas ambiciosos. El estado chino dedica 130 mil millones de dólares al año a este tema, lo que equivaldría a una inversión de 600 mil millones de dólares en Occidente, teniendo en cuenta las diferencias de índice de precios, según indica la asesora americana Lux Research. De hecho, China y Japón están registrando continuamente más patentes. Todas estas investigaciones serían, sin embargo, más eficaces en los temas más interdisciplinares, si la visión interdisciplinar progresara verdaderamente. El informe mencionado de Étienne Klein, Alexei Grinbaum y Vincent Bontems no llega a esta conclusión, tras analizar las publicaciones mundiales en este campo. Se agradece el esfuerzo dedicado a investigación en los Estados Unidos y en la Unión Europea, pero la debilidad del compromiso de las empresas del viejo continente hace que se corra el riesgo de esterilizar la inversión en formación e investigación del sector público soportada por los contribuyentes europeos. No hay innovación sin emprende-

---

<sup>77</sup> PAJAK, Marina y PESCIA, Dimitri. *Les Nanotechnologies. Analyse comparative de l'état actuel des efforts institutionnels en Allemagne, en Europe et dans le reste du monde*. París: ADIT, informe de la embajada de Francia en Alemania, 15 junio 2007.

dores. Las claves del nanomundo tienen este precio. Esta situación recuerda de nuevo a la de las biotecnologías y la innovación en general.<sup>78</sup> Así y todo, en Europa hay tantos empresarios creativos que los está exportando a Estados Unidos... El problema es tan evidente y lo que está en juego es tan importante para el futuro que el paso adelante va a ser inminente. Por lo menos, esta es nuestra apuesta.

---

<sup>78</sup> THOMAS, Daniel y PORTNOFF, André-Yves. *Repenser les biotechnologies/ Rethinking the Biotechnologies*. Paris: Futuribles (Perspectives), 2007, y «Repensar las Ciencias de la Vida. Una Mirada sistemática que revoluciona las biotecnologías». Capital Intelectual. Buenos Aires, 2009.



## **DOCUMENTOS COTEC sobre OPORTUNIDADES TECNOLÓGICAS**

### **Documentos editados**

- N.º 1: Sensores.
- N.º 2: Servicios de información técnica.
- N.º 3: Simulación.
- N.º 4: Propiedad industrial.
- N.º 5: Soluciones microelectrónicas (ASIC) para todos los sectores industriales.
- N.º 6: Tuberías de polietileno para conducción de agua potable.
- N.º 7: Actividades turísticas.
- N.º 8: Las PYMES y las telecomunicaciones.
- N.º 9: Química verde.
- N.º 10: Biotecnología.
- N.º 11: Informática en la Pequeña y Mediana Empresa.
- N.º 12: La telemática en el sector de transporte.
- N.º 13: Redes neuronales.
- N.º 14: Vigilancia tecnológica.
- N.º 15: Materiales innovadores. Superconductores y materiales de recubrimiento.
- N.º 16: Productos alimentarios intermedios (PAI).
- N.º 17: Aspectos jurídicos de la gestión de la innovación.
- N.º 18: Comercio y negocios en la sociedad de la información.
- N.º 19: Materiales magnéticos.
- N.º 20: Los incentivos fiscales a la innovación.
- N.º 21: Minería de datos.
- N.º 22: Wireless.
- N.º 23: Robótica y Automatización.
- N.º 24: Los informes tecnológicos en patentes.
- N.º 25: Diseño e innovación. La gestión del diseño en la empresa.
- N.º 26: Invernaderos de plástico.
- N.º 27: Claves para el nanomundo.

## **DOCUMENTOS COTEC sobre NECESIDADES TECNOLÓGICAS**

### **Documentos editados:**

- N.º 1: Sector lácteo.
- N.º 2: Rocas ornamentales.
- N.º 3: Materiales de automoción.
- N.º 4: Subsector agroindustrial de origen vegetal.
- N.º 5: Industria frigorífica y medio ambiente.
- N.º 6: Nuevos productos cárnicos con bajo contenido en grasa.
- N.º 7: Productos pesqueros reestructurados.
- N.º 8: Sector de la construcción.
- N.º 9: Sector de la rehabilitación.
- N.º 10: Aguas residuales.
- N.º 11: Acuicultura.
- N.º 12: Reducción de emisiones atmosféricas industriales.
- N.º 13: El mantenimiento como gestión de valor para la empresa.
- N.º 14: Productos lácteos.
- N.º 15: Conservas vegetales.







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

ISBN 978-84-92933-07-5



**Cotec** —

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

AGENCIA DE DESARROLLO ECONÓMICO LA RIOJA  
AGENCIA DE INVERSIONES Y SERVICIOS DE LA JUNTA DE CASTILLA Y LEÓN  
AGENCIA NAVARRA DE INNOVACIÓN Y TECNOLOGÍA  
ALMA CONSULTING GROUP  
ALMIRALL  
APPLUS+  
ASESORÍA I+D+i  
ATOS ORIGIN ESPAÑA  
AYUNTAMIENTO DE GIJÓN  
AYUNTAMIENTO DE VALENCIA  
BBVA  
BILBAO BIZKAIA KUTXA  
CAJA DE AHORROS Y PENSIONES DE BARCELONA (LA CAIXA)  
CÁMARA DE COMERCIO E INDUSTRIA DE MADRID  
CIDEM  
CLARKE MODET & CO  
CONSEJERÍA DE EDUCACIÓN Y CIENCIA DE LA JUNTA DE CASTILLA-LA MANCHA  
CONSEJERÍA DE INNOVACIÓN, CIENCIA Y EMPRESA DE LA JUNTA DE ANDALUCÍA  
CORPORACIÓN TECNOLÓGICA DE ANDALUCÍA  
CRISA  
DELOITTE  
DEPARTAMENTO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA Y UNIVERSIDAD DEL GOBIERNO DE ARAGÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN DE LA XUNTA DE GALICIA  
DIRECCIÓN GENERAL DE UNIVERSIDADES E INVESTIGACIÓN DE LA CONSEJERÍA DE EDUCACIÓN DE LA COMUNIDAD DE MADRID  
ENDESA  
ENRESA  
ESTEVE  
EUROCONTROL  
EUSKALTEL  
EVERIS

FUNDACIÓN ACS  
FUNDACIÓN BARRIÉ DE LA MAZA  
FUNDACIÓN CAMPOLLANO  
FUNDACIÓN FOCUS-ABENGOA  
FUNDACIÓN IBIT  
FUNDACIÓN LILLY  
FUNDACIÓN RAMÓN ARECES  
FUNDACIÓN UNIVERSIDAD-EMPRESA  
FUNDACIÓN VODAFONE  
FUNDECYT  
GAS NATURAL FENOSA  
GÓMEZ-ACEBO & POMBO ABOGADOS  
GRUPO MRS  
GRUPO PRISA  
GRUPO SPRI  
HC ENERGÍA  
HISPASAT  
IBERDROLA  
IBM  
IMADE  
IMPIVA  
IMPULSO  
INDRA  
INSTITUTO DE DESARROLLO ECONÓMICO DEL PRINCIPADO DE ASTURIAS  
INSTITUTO DE FOMENTO DE LA REGIÓN DE MURCIA  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CANARIAS S.A.  
LA SEDA DE BARCELONA  
LECHE PASCUAL  
MERCADONA  
MIER COMUNICACIONES  
OHL  
PATENTES TALGO  
PRICEWATERHOUSECOOPERS  
REPSOL YPF  
SADIEL  
SIDSA  
SOLUTEX  
TALÈNCIA CATALUNYA RECERCA  
TELEFÓNICA  
VICINAY CADENAS  
ZELTIA