

NANOCIENCIA Y NANOTECNOLOGÍA: ASPECTOS GENERALES

Pedro Amalio Serena Domingo

Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid

Consejo Superior de Investigaciones Científicas U.A.M.

1. INTRODUCCIÓN: ¿QUÉ ENTENDEMOS POR NANOTECNOLOGÍA Y NANOCIENCIA?

Los conceptos de ciencia y tecnología se refieren a aspectos distintos del conocimiento humano. En una primera aproximación, y acudiendo al Diccionario de la Real Academia Española [1], se verifica que la palabra *Ciencia*, entre varias acepciones tiene la de “el conocimiento cierto de las cosas por sus principios o causas” mientras que el término *Tecnología* se refiere al “conjunto de conocimientos, instrumentos y procedimientos propios de un oficio mecánico o arte industrial”. En definitiva, cada palabra describe una faceta diferente de la actividad del ser humano, por un lado como ser curioso y necesitado de entenderse a sí mismo y su entorno, mientras que por otro la tecnología presenta su actividad como manipulador, modificador y constructor. Estamos ante unas definiciones demasiado generales y la especialización, la necesidad de concreción, conduce a nuevos términos que delimitan más la parcela de conocimiento en función de intereses concretos (Neurociencia, Biotecnología, Mercadotecnia,...). Anteponer el prefijo “nano” a ambos términos sencillamente significa que nos adentramos en el reino de lo realmente diminuto.

Para ser más precisos, el prefijo “nano” se refiere a la posibilidad de conocer los fundamentos y propiedades de objetos (Nanociencia) y diseñar objetos o dispositivos con funciones específicas (Nanotecnología) cuyas dimensiones son de unos pocos nanómetros. El nanómetro (nm) es una unidad de longitud equivalente a la millonésima parte de un milímetro (ó 10^{-9} metros usando las maneras de los científicos). En un nanómetro podríamos alinear menos de una decena de átomos.

El nanómetro representa una escala perfecta para describir las dimensiones de una molécula, sin embargo aparece algo inútil para describir el tamaño de los objetos que nos rodean. Quizás, reflexionando un poco, esta afirmación haya que replantearla. Basta con pensar que el hombre fabrica circuitos integrados (usados en los omnipresentes ordenadores) mediante una tecnología que permite escribir pistas (por donde circula la información) de un ancho inferior a los 200 nanómetros. Sin darnos cuenta, de forma paulatina, y de forma simultánea a la exploración del espacio, indagando más y más lejos, el hombre ha ido acumulando conocimientos y metodologías que le permiten tener control sobre objetos cada vez más y más pequeños.

La “microciencia” y la “microtecnología” (términos que nunca han tenido un uso muy extendido y que contienen el prefijo “micro” derivado del micrómetro o micra, la milésima parte de un milímetro) han dejado de ser la frontera de la exploración hacia lo diminuto. Dicha frontera, la nueva marca del conocimiento, se ha desplazado hasta lo que ahora denominamos Nanociencia y Nanotecnología. En general los conocimientos científicos relacionados con la Nanociencia son muchos en comparación con los objetos o dispositivos construidos mediante aplicación de la Nanotecnología. Sin embargo, es el término Nanotecnología el que ha ganado más adeptos, englobando por lo general tanto el conjunto de conocimientos básicos como el amplio abanico de aplicaciones reales o venideras. En el resto de este artículo me sumaré a la moda de englobar ambos contenidos en una única palabra (Nanotecnología) aunque sea sabedor del mayor desarrollo de la Nanociencia.

Como ya veremos más adelante la Nanotecnología tiene sus fundamentos en ideas y conceptos lanzados a lo largo de la segunda mitad del siglo XX y que cristalizaron a finales en la década de 1980. El término “Nanotecnología” fue acuñado por el Profesor Norio Taniguchi en 1974 en una conferencia sobre Ingeniería de la Producción [2]. Según su definición la Nanotecnología era la tecnología necesaria para poder fabricar objetos o dispositivos (circuitos integrados, memorias de ordenador,

dispositivos optoelectrónicos, etc) con una precisión del orden de 1 nm. En la década siguiente se fue fraguando una definición que afirmaba que la Nanotecnología era “la tecnología donde las dimensiones o tolerancias en el rango de 0.1 a 100 nm (desde el tamaño del átomo a la longitud de onda de la luz) juegan un tamaño crítico”[3]. Esta definición se ha seguido manteniendo por parte de la comunidad científica [4] y se conoce como aproximación *top-down* (de arriba hacia abajo, de lo grande a lo pequeño). Un concepto alternativo irrumpió en 1986 cuando Eric Drexler [5] propuso construir objetos más grandes a partir de sus componentes atómicos y moleculares. Esta aproximación se conoce como *bottom-up* (de abajo hacia arriba). En la actualidad se usa la terminología de Nanotecnología Molecular [6] para describir esta aproximación.



D. Amalio Serena Domingo

Ambas concepciones, *top-down* y *bottom-up*, de la Nanotecnología coexisten y a *grosso modo* puede decirse que provienen del mundo de la Física y de la Química, respectivamente. Sin embargo existe una mayoritaria opinión partidaria de la filosofía de ensamblar dispositivos a partir de sus componentes, como en un gran juego de construcción donde las piezas a ensamblar serán átomos y moléculas. Sin embargo, esta filosofía representa un gran reto a los conocimientos tecnológicos actuales. En otros artículos de este mismo volumen se profundiza en ambas aproximaciones[7,8]. Una definición más política, que acerca ambas posturas, es la dada por M. Roco, responsable de la Iniciativa Nacional en Nanotecnología (NNI) de los Estados Unidos [9] que afirma que la Nanotecnología es “la investigación y desarrollo tecnológico a nivel atómico, molecular y supramolecular destinados a proporcionar entendimiento fundamental de los fenómenos y los materiales en la nanoescala (1-100 nm) y poder así crear y usar estructuras, dispositivos y sistemas que presenten nuevas propiedades y funciones debido a su tamaño pequeño o intermedio” [9]. Es interesante fijarse en el concepto de “nanoescala” para referirse a las dimensiones comprendidas entre 1 y 100 nm, donde la Nanotecnología debe mostrar todo su potencial.

2. EL LARGO CAMINO HACIA LO 'NANO'.

El hombre ha utilizado su inteligencia como punto de apoyo para constituirse en la especie predominante en la Tierra. Aspectos de esa inteligencia han sido su curiosidad, su capacidad de asimilar el entorno y utilizar herramientas para obtener beneficios directos del mismo (alimento), modificarlo y también para producir nuevas herramientas. Hace 2.5 millones de años que el hombre manipulaba piedras para producir instrumentos cortantes. En aquel entonces la precisión de golpeo seguramente permitía controlar la ruptura de la piedra con una precisión de unos pocos milímetros.

Desde entonces las tecnologías adquiridas por los seres humanos siempre implicaban la manipulación de objetos de grandes dimensiones y rara vez surgía el interés por manipular objetos de tamaños inferiores al milímetro.

Hay que esperar hasta la llegada del telar desarrollado en Egipto en el siglo XV a.C. para encontrar una tecnología en la que el hombre está interesado en manipular y combinar fibras de plantas vegetales, hilos de seda, etc, con dimensiones cercanas a la décima del milímetro. El control de las formas en objetos pequeños en joyería y orfebrería también data de esas épocas. Casi tres mil años después, con la llegada de la Edad Moderna, se despierta de forma definitiva el interés por la Ciencia, por acumular todo tipo de conocimientos, por explorar el Universo, nuestro propio planeta, nuestro entorno y a nosotros mismos. Surgen teorías, metodologías y herramientas, y entre estas últimas el microscopio óptico, instrumento que nos permite profundizar hacia lo pequeño. Los hermanos Jansen (1595), Galileo (1608), Hooke (1665), y Leeuwenhoek (1673), entre otros, contribuyeron al desarrollo de una tecnología que fue crucial para el ulterior desarrollo científico. Sin embargo, la longitud de onda de la luz visible determina el límite inferior (poder de resolución) de la separación entre objetos que puede distinguirse con un microscopio óptico. Durante un largo tiempo la exploración se detuvo en sistemas de dimensiones cercanas a la micra.

El descubrimiento del electrón por J.J. Thomson en 1897 usando su famoso tubo de rayos catódicos representa un hito en la historia de la Humanidad. De esto no hay duda ya que el desarrollo tecnológico experimentado durante el siglo XX se ha basado de forma predominante en la capacidad del hombre para usar el electrón con el fin de transportar y almacenar energía, producir y recibir ondas electromagnéticas, y manipular corrientes de electrones moduladas o pulsadas capaces de transportar información. Ha sido el siglo de la Electrónica, la ciencia que ha “domesticado” el electrón. Pero también ha sido el siglo de la Mecánica Cuántica. En particular, el principio mecanocuántico de la dualidad onda-corpúsculo permite utilizar electrones como sondas análogas a la luz y desarrollar por lo tanto potentes microscopios electrónicos que usan haces de electrones con gran energía cinética.

Desde el desarrollo del primer microscopio electrónico de transmisión (TEM, *Transmission Electron Microscope*) en 1931 por W. Knoll y E. Ruska, y del primer microscopio electrónico de barrido (SEM, *Scanning Electron Microscope*) en 1937 por M. Von Ardenne hasta nuestros días, el hombre ha sido capaz de seguir sumergiéndose más y más en búsqueda de lo pequeño usando estas refinadas herramientas. Hoy en día el poder de resolución logrado con un microscopio de transmisión es de unas pocas décimas de nanómetro [10], lo que sin duda permite afirmar que la limitación de adentrarse en la nanoescala como observador ha desaparecido.

Es obvio que la Electrónica ha revolucionado nuestras vidas, pero conviene recordar que los primeros pasos de esta tecnología fueron en una dirección diferente de la actual. Durante la primera mitad del siglo XX es la Electrónica de Vacío, heredera del tubo de rayos catódicos inventado por J.J. Thomson la tecnología predominante. La invención del triodo de vacío por Lee De Forest en 1906 supuso la preponderancia de la Electrónica de Vacío. Este camino tiene su punto álgido en la década de 1940, cuando aparecen las primeras “máquinas para calcular” basadas en decenas de miles de triodos de vacío [11]. Los cálculos eran lentos, los sistemas eran propensos a fallar y consumían muchísima energía. Se había llegado a un punto donde la tecnología imperante había dado de sí todo lo que podía. Eran dinosaurios a punto de la extinción. Aún así, estas grandes máquinas de cálculo estuvieron en servicio hasta principios de la década de 1960 en diversos organismos oficiales de los EE.UU.

La anterior situación de estancamiento se modificó cuando en diciembre de 1947 John Bardeen, Walter Brattain y William Shockley desarrollan el primer transistor en los Laboratorios Bell. Este es el punto de partida para el vertiginoso desarrollo de la Electrónica de Estado Sólido, donde los materiales semiconductores han desempeñado un papel clave. Estos investigadores fueron galardonados con el Premio Nobel de Física en 1956. En 1958 J.S. Kilby (Premio Nobel en el año 2000) desarrolla en

Texas Instruments el primer circuito integrado, abriéndose el paso a una nueva concepción de dispositivo electrónico fabricado con técnicas litográficas. Pero el detalle más importante de este desarrollo era que si se deseaba aumentar la potencia de cálculo había ahora otra opción: disminuir el tamaño de los motivos litografiados de forma que más elementos pudiesen incluirse en la misma superficie. Había nacido el concepto de *miniaturización* o integración aplicado a la Electrónica.



*Reunión preparatoria del Encuentro-Debate sobre Nanociencia y Nanotecnología.
De izquierda a derecha (arriba): Jesús Lizcano, Ana Dopazo, Tomás Torres y Roberto Marco;
(abajo): Arturo Baró, Carlos A. Martínez y Pedro Serena*

En torno a esta idea han surgido cientos de mejoras técnicas, nuevo equipamiento, etc, que de forma constante han aumentado la capacidad de integrar circuitos electrónicos. Es obligado mencionar aquí la invención de la técnica de crecimiento de capas por haces moleculares (MBE, *Molecular Beam Epitaxy*) por A.Y. Cho y J.R. Arthur en 1975 que permite crecer materiales capa a capa con precisión atómica, toda una demostración de la capacidad última de manipulación indirecta de la materia a escala atómica.

El incesante aumento de la capacidad de integración se ha visto reflejado en un continuo aumento de la velocidad de los procesadores, y de la capacidad de almacenamiento de las memorias de ordenador y de los discos duros. Esta tendencia fue vaticinada por G. Moore en 1965 [12] cuando predijo que cada 12 meses aproximadamente se doblaría el número de circuitos incluidos en un chip. Desde entonces esta predicción (la llamada “Ley de Moore”) se ha venido cumpliendo aproximadamente.

Sin embargo, expertos por todo el mundo anuncian que tarde o temprano se deberá dejar de cumplir dicha ley debido a varios factores [13]. En primer lugar tenemos un factor limitador de tipo físico. La tecnología actual basada en el uso de los semiconductores debe verse condicionada por el hecho de que la densidad de electrones en un semiconductor es relativamente baja si se compara con la de un metal. Por ejemplo, típicamente sólo hay un electrón disponible en 1000 nm^3 de semiconductor. Es decir, de seguir el actual ritmo de integración con semiconductores, antes de 20 años nos

encontraremos con dispositivos vacíos de electrones. Aparte de esta limitación hay alguna más de origen físico que no será discutida aquí.

El segundo factor es de índole económica. A medida que la integración crece, los costes de las empresas para financiar la investigación previa así como las nuevas técnicas de producción, caracterización, litografiado y ensamblaje crecen de manera vertiginosa. Cada nuevo paso en la integración implica que hay que mejorar las ventas para poder amortizar la inversión realizada. Esta amortización no suele reflejarse en el precio del nuevo producto y se consigue mediante un aumento de producción. De esa manera cada vez más y más procesadores, memorias, etc, están disponibles para ser incluidos en otros equipos, instrumentos o herramientas dando lugar a la sociedad tecnológica que conocemos hoy en día. Sin embargo, los terribles costes de investigación y producción, así como las modificaciones de las condiciones del mercado y la economía, pueden hacer cambiar la ley de Moore mucho antes de que se llegue a la limitación de tipo físico.

Sea cual sea la causa de la modificación de la ley de Moore, lo que está claro es que se necesitan alternativas que permitan seguir con la integración de los circuitos electrónicos de forma viable económicamente. Cualquiera que sea dicha alternativa debemos estar preparados para trabajar en la escala del nanómetro, lugar natural hacia donde tiende una industria que paulatinamente abandona el término de la Microelectrónica sustituyéndolo por el de Nanoelectrónica.

Finalmente nos encontraremos con los átomos y las moléculas, con la necesidad de manejarlos y disponerlos de forma que puedan realizar funciones específicas. Pero ¿es esto posible? Esta pregunta ya se la formuló R.P. Feynman (Premio Nobel de Física en 1965) en su celebre seminario impartido en 1959 titulado “*There’s Plenty of Room at the Bottom*” (“Hay un montón de sitio al fondo”)[14]. En esencia Feynman venía a afirmar que la manipulación atómica no violaba ninguna ley física y que el hecho de no poder llevarse a cabo era debido a que los hombres no tenían las herramientas adecuadas y habría que esperar a que dicho instrumental fuese desarrollado. También vaticinaba las grandes oportunidades que ofrecería la manipulación de objetos diminutos. La espera duró dos décadas. En 1981 dos investigadores de IBM, H. Rohrer y G. Binnig, dieron a conocer el microscopio de efecto túnel (STM, *Scanning Tunneling Microscope*) que permitió por vez primera ver superficies con resolución atómica. Por dicho descubrimiento los dos investigadores (junto con E. Ruska) recibieron el Premio Nobel de Física en 1986. Dicho microscopio usa corrientes electrónicas (otra vez los electrones) y aplica una consecuencia de la Mecánica Cuántica (otra vez la Mecánica Cuántica) para poder ver la topología de la superficie con precisión atómica.

Esta herramienta ha sido la antecesora de otro grupo de herramientas, los microscopios de proximidad, que permiten medir otras propiedades (fuerzas, intensidad luminosa, etc) a escala nanométrica, y lo que es más importante, manipular la posición de los átomos sobre una superficie a voluntad. En este mismo ejemplar se dan más detalles sobre esta familia de herramientas [7]. Más importante que la técnica en sí misma ha sido el cambio de filosofía que ha supuesto la aparición de este tipo de herramientas, ya que permite introducir dentro de la Física la aproximación abajo-arriba, que en principio tiene un fundamento más químico. Desde luego nos encontramos ante fascinantes herramientas que permitirán avances significativos de la Nanotecnología.

3. ALGUNAS CARACTERÍSTICAS PROPIAS DE LA NANOTECNOLOGÍA.

En el apartado anterior se ha descrito cómo el ser humano ha recorrido un largo camino desde la grosera manipulación de piedras hasta la sofisticada visualización y modificación de la materia a escala atómica. Sin embargo la parte final de la historia ha sido contada de forma algo sesgada y vinculada a los avances ocurridos en la segunda mitad del siglo XX en Física, y más en particular centrándose en el nacimiento y evolución de la Microelectrónica.

Esta visión es sólo una parte de la verdad. En realidad la constitución de la materia, su fundamentación atómica y molecular, es común a todas las Ciencias. Cuando un biólogo o un químico analizan las bases del funcionamiento último de la reproducción de un ser vivo o de una reacción catalítica, por poner dos ejemplos, se encuentran con entidades de tamaño nanométrico y regidas por las mismas leyes físicas. También son Nanotecnología la síntesis con precisión nanométrica de catalizadores o moléculas para usos diversos, la capacidad de modificar un fragmento de una cadena de ADN, o la síntesis de un material magnético nanoestructurado para ser usado como marcador tumoral. En esta escala todas las disciplinas convergen siendo diferente la perspectiva o el punto de partida.

Esta particularidad hace de la Nanotecnología una ciencia *multidisciplinar* donde se entremezclan los modos de hablar particulares y las técnicas de aproximación para entender la materia inerte o viva. Es cierto que cada disciplina tiene una mayor o menor cercanía con el mundo a escala nanométrica, pero con el devenir del tiempo las temáticas más alejadas de la visión nanométrica se irán acercando a ella a medida que las metodologías emergentes lo permitan.

Otro aspecto a destacar de la Nanotecnología es que la materia a escala nanométrica se rige por unas reglas del juego bien asentadas a lo largo de la primera mitad del siglo XX: la *Mecánica Cuántica*. Este hecho es crucial ya que determina que la materia cambie sus propiedades macroscópicas a medida que el volumen del material se hace más y más pequeño. Además de este cambio natural de las propiedades, la Nanotecnología va a permitir combinar elementos a escala nanométrica permitiendo “sintonizar” a gusto del modelador las propiedades del material o dispositivos creados. Para combinar a esta escala la materia hay varias opciones como se ha dicho anteriormente (de arriba hacia abajo y el camino inverso) sin que se sepa cual será la adoptada finalmente en la industria, aunque seguramente cada problema, cada diseño, tenga su propio proceso productivo óptimo.

Otro punto crítico de la Nanotecnología es que la modelización, la representación computacional de los procesos a escala nanométrica, jugará un papel crucial. De hecho hay potentes y sofisticadas herramientas (hardware y software) disponibles para ello. Lo curioso es que muchas de estas herramientas tenían problemas de capacidad para analizar y modelar la naturaleza a escalas mayores. En este caso ha sido el tipo de problema a tratar el que se ha ido reduciendo de dimensiones de forma que cálculos inviables ahora son factibles. La importancia del tratamiento cuántico de la materia en la nanoescala implicará por ejemplo que los estudios de ingeniería contemplen la Mecánica Cuántica como materia fundamental en el diseño de futuros dispositivos.

En resumen, podemos afirmar que nos encontramos ante un nuevo paradigma científico de carácter pluridisciplinar, donde Química, Ingeniería, Biología, Física, Medicina, Ciencia de Materiales, y Computación convergen, y donde la superposición de diferentes intereses iniciales traerá consigo el planteamiento de nuevos problemas y entrecruzamiento de planteamientos para resolverlos (sinergias).

4. LÍNEAS BÁSICAS DE LA NANOTECNOLOGÍA.

En las últimas tres décadas el desarrollo de la especie humana se ha sustentado en la aparición de dos pilares tecnológicos: las tecnologías de la información y la biotecnología. Ambas seguirán aportando en los próximos años un gran caudal de conocimientos, dispositivos, y bienes de consumo. La Nanotecnología, de irrupción más reciente, de carácter más híbrido, será en pocos años el tercer pilar tecnológico con el que la Humanidad se aventurará en el siglo XXI. Las perspectivas que abre la Nanotecnología son impresionantes y será posible, a lo largo de las dos próximas décadas, obtener potenciales avances que ahora parecen de ciencia-ficción. A modo de resumen se pueden citar las principales líneas en las que la Nanotecnología jugará un papel fundamental:

1. Aplicaciones estructurales (Cerámicas y materiales nanoestructurados, nanotubos, recubrimientos con nanopartículas, etc).
2. Procesamiento de la información (Nanoelectrónica, Optoelectrónica, Materiales Magnéticos).
3. Nanobiotecnología (Encapsulado y dosificación local-dirigida de fármacos).
4. Sensores.
5. Procesos catalíticos y electroquímicos.
6. Aplicaciones a largo plazo (sistemas para computación cuántica, autoensamblado molecular, interacción de moléculas orgánicas con superficies).

Esta claro que la lista de posibles aplicaciones es muy grande. La Nanotecnología aporta una nueva forma de pensar tan arrolladora que las diversas comunidades científicas se han apresurado a bautizar algunas de las parcelas donde trabajaban con nombres donde el prefijo ‘nano’ es el indicador de este cambio de tendencia. Ya se habla de Nanoquímica, Nanomedicina, Nanomecánica, Nanomagnetismo, Nanobiología, Nanobiotecnología, Nanoelectrónica, Nanotribología, etc. Podemos afirmar que se ha salido de la era de lo ‘Micro’ y se ha entrado en la era de lo ‘Nano’.

5. LA NANOTECNOLOGÍA EN LAS ADMINISTRACIONES PÚBLICAS.

Hoy la Nanotecnología está todavía en su infancia, pero en el futuro se perfilan incrementos de ordenes de magnitud en la eficiencia de los ordenadores, la posibilidad de restauración de órganos humanos mediante tejidos prediseñados, o de nuevos materiales creados por autoorganización de átomos y moléculas, así como la emergencia de fenómenos físicos y químicos completamente nuevos. Estamos ante un potencial inmenso de aplicación, de valor añadido, de rápida traducción a dispositivos y bienes de consumo. Es obvio que muchos de estos no se harán realidad hasta dentro de unas décadas, pero también es verdad que otros muchos van a invadir nuestras vidas en menos de dos años (citemos por ejemplo las pantallas ultraplanas de los teléfonos móviles de tercera o cuarta generación o los últimos sistemas de almacenamiento magnético). Ante este previsible desarrollo, los dirigentes de la política científica-tecnológica de los países más avanzados están desarrollando mecanismos que asienten e impulsen el desarrollo nanotecnológico.

En la Tabla 1 se muestran los recursos que en la actualidad distintas administraciones públicas dedican a la Nanotecnología.

Tabla 1. Financiación de la Nanotecnología en el mundo

<i>Presupuesto dedicado a Nanotecnología (M\$ / año)*</i>							
<i>Región</i>	<i>1997</i>	<i>1998</i>	<i>1999</i>	<i>2000</i>	<i>2001</i>	<i>2002</i>	<i>2003</i>
Europa Occidental	126	151	179	200	225	400	-
Japón	120	135	157	245	465	750	-
EE.UU.**	116	190	255	270	422	604	710
Otros***	70	83	96	110	380	520	-
TOTAL	432	559	687	825	1502	2274	
<p>* Fuente: M.Roco (National Science Foundation, EE.UU.) “Government Nanotechnology Funding: An international outlook”</p> <p>** No incluye las iniciativas estatales.</p> <p>*** Otros: Australia, Corea, Canadá, Taiwán, China, Rusia, Singapur, Europa del Este.</p>							

Como se observa, las inversiones en Nanotecnología han ido creciendo de manera constante, indicando claramente el interés generalizado por promoverla. En Estados Unidos la “National Science Foundation” (NSF) ha lanzado el plan NNI (National Nanotechnology Initiative) [9] que ha invertido más de 1600 millones de dólares en seis años para fomentar la investigación multidisciplinar en el área de la Nanociencia y Nanoingeniería. Sin embargo esta iniciativa federal es pequeña cuando se compara con las iniciativas estatales llevadas a cabo en California, Texas, etc, donde se destinan decenas de millones de dólares para la creación de centros dedicados a Nanotecnología. A su vez cientos de laboratorios y grupos de investigación han cambiado su denominación incluyendo el prefijo “nano” para reflejar un interés real por esta nueva ciencia y como clara apuesta por ubicarse en línea con las tendencias marcadas por la Administración.

Japón cuenta también con un poderoso plan soportado desde los sectores industriales y el gobierno [15]. En países como Corea la iniciativa fundamentalmente tiene base industrial (por ejemplo la empresa Samsung dedica más de 500 personas a desarrollos basados en Nanotecnología en un centro de investigación creado recientemente). China también se ha incorporado recientemente a esta carrera con un gran vigor, tras haber formado a miles de científicos fuera de sus fronteras en materias relacionadas con la Nanotecnología.

En Europa, de forma más modesta e indecisa, se han ido estableciendo poco a poco planes nacionales o europeos donde la Nanotecnología se presenta como un punto clave para el desarrollo de la región. En general los países europeos más poderosos están reorganizando sus esquemas de organización científica en base a la Nanotecnología (entre otros nuevos saberes). En Alemania, por ejemplo, el Ministerio de Investigación y Tecnología (MBFT) estableció ya en 1998 seis centros nacionales de competencia en Nanotecnología. En Francia se ha constituido un gran centro dedicado a Nanotecnología (MINATEC en Grenoble). Reino Unido ha adoptado decisiones similares. La Unión Europea, con más orientación hacia el desarrollo de la Nanoelectrónica lanzó hace tres años la iniciativa NID (Nanotechnology Information Devices) [16], dentro del plan IST (Information Society Technologies), para fomentar la creación de consorcios con la finalidad de no perder terreno frente a los EE.UU. o a Japón. Estos tímidos pasos se han consolidado en un serio impulso de la Nanotecnología en el VI Programa Marco de la U.E. De hecho unas de las áreas que va a ser impulsada tiene como nombre “*Nanotecnologías y Nanociencias, Materiales Multifuncionales y nuevos procesos de producción*” y estará dotada con 1.300 millones de Euros en el periodo 2003-2006 [17]. El auge en Europa de las iniciativas dedicadas a desarrollar y divulgar la Nanociencia han sido muchas, hasta el punto de que hoy en día existen más de 160 redes nacionales o regionales dedicadas a aunar esfuerzos en este decisivo tema.

La situación de la Nanotecnología en España es bastante contradictoria. Por un lado existen muchos grupos de investigación cuyo personal se ha ido formando tanto en España como en el extranjero. Ese grupo de investigadores ha ‘crecido científicamente’ dentro de un contexto en el que la misma Nanotecnología ha ido surgiendo. Por otro lado, no existe un Programa Nacional específico para la Nanotecnología donde se aglutinen de forma constructiva los esfuerzos de todas esas personas cualificadas. Por ejemplo en el Plan Nacional de I+D+I (2001-2003) la palabra “Nanotecnología” aparece citada menos de una decena de veces, vinculada a su futuro desarrollo, en un documento de varios cientos de páginas [18]. Desde una perspectiva industrial, existe un gran desconocimiento de las implicaciones que a medio plazo van a tener los desarrollos tecnológicos y puede que la situación de dependencia tecnológica se incremente en el futuro, como ha ocurrido otras veces en diferentes materias. Lo que es claro es que el tránsito del saber básico hacia la aplicación industrial es a medio plazo y que desde ahora hay que ir sentando las bases de ese tránsito.

En general las iniciativas existentes para el impulso de la Nanotecnología son escasas y surgen de los propios científicos o son forzadas desde la Unión Europea. Citaremos aquí la existencia de la Red *Nanociencia*, financiada modestamente por el Ministerio de Ciencia y Tecnología, o la Red *NanoSpain* [19], que agrupa a más de 80 grupos de investigación. Además, me gustaría mencionar que

ya existen otros esfuerzos institucionales, como la creación de un instituto de Nanobiotecnología en Cataluña y la creación del Instituto de Nanotecnología y Diseño Molecular (dentro del recientemente constituido Parque Científico de Madrid). A pesar de la escasa aportación desde el Estado, esta claro que existe una dinámica en la dirección de poder tomar el tren de la Nanotecnología. De no ser así ahondaríamos en el mal que siempre ha estado acosando a este país desde la Revolución Industrial: la dependencia tecnológica.

6. EL IMPACTO SOCIAL DE LAS NANOTECNOLOGÍAS. UN EJEMPLO CONCRETO: EL MEDIOAMBIENTE.

Hacer predicciones sobre el impacto social de cualquier avance tecnológico es arriesgado y un ejercicio que en ocasiones conduce a una representación de la sociedad futura muy cercana a lo que podría ser un texto de ciencia-ficción. Además, temas como la Nanotecnología o la Ingeniería Genética son los suficientemente atractivos como para que sean una fuente de recursos inagotable para los escritores o periodistas que se dedican a la divulgación científica. Quizás el primer impacto social de la Nanotecnología haya sido el impacto mediático. En pocos años lo ‘nano’ ha pasado de ser un tema inexistente para la mayoría de la población a ser objeto de extensos reportajes en revistas de divulgación científica o en las secciones especializadas en Ciencia de periódicos o programas de televisión y radio [20]. Otra forma de corroborar el interés que suscita un tema es medirlo a través de su difusión por Internet. Si se realiza la búsqueda del término “Nanotecnología” en algún buscador de información solvente se encuentra que más de 400.000 sitios están relacionados con dicho término. Dicho número es grande pero se queda pequeño si se compara con los resultados del término “Genética” (2.500.000 sitios) o el término “Electrónica” (16.500.000 páginas web) que llevan más tiempo “conviviendo” con la población.

Es obvio que las expectativas levantadas son grandes y la divulgación científica ayuda a consolidarlas. Sin embargo el impacto social de la Nanotecnología, entendido como bienestar o avance que aportará a la civilización, está siendo objeto de profundo debate en distintos foros (Administraciones Públicas, Organismos Internacionales, Asociaciones Científicas, etc)[21]. Este debate es paralelo al aumento de financiación dedicado a la Nanotecnología y es obligado porque tal incremento debe ser justificado frente a la sociedad. A su vez, las fuertes inversiones en Nanotecnología no se realizan únicamente desde los Estados. Iniciativas privadas y consorcios de capital riesgo se están lanzando a financiar proyectos basados en la aplicación directa o indirecta de la Nanotecnología.

En este mismo número de la revista el Prof. J. Lizcano aborda con mayor profundidad las repercusiones sociales y económicas que la Nanotecnología lleva asociadas. Sin embargo, voy a enumerar rápidamente algunos aspectos que sufrirán profundas modificaciones por la irrupción de la Nanotecnología. Podemos destacar la profundización en el camino hacia la sociedad completamente informatizada (computadores y periféricos más avanzados y diminutos, implantación masiva de microprocesadores en sistemas cotidianos, domótica, docencia), las aplicaciones en medicina y farmacia (fármacos inteligentes, detección precoz), el desarrollo de nuevos materiales (vehículos más ligeros, tejidos más resistentes, nuevas técnicas de construcción), la seguridad nacional (detección de ataques biológicos o bioquímicas, sistemas inteligentes de adquisición de información, armas biológica miniaturizadas), los nuevos catalizadores (ahorro energético, mejora procesos productivos), etc.

Aunque las áreas de desarrollo citadas anteriormente son importantísimas me gustaría referirme a una cuestión que ha ido suscitando el interés de la sociedad occidental (e incluso de sus gobernantes ante la presión de la opinión pública) en el último tercio del s XX. Me refiero a la preocupación por las cuestiones medioambientales, la destrucción de ecosistemas, optimización en el uso de recursos naturales, y el desarrollo sostenible [22]. Esta preocupación es propia de los países desarrollados y ha influenciado las políticas locales y regionales, los procesos de producción, etc.

La Nanotecnología tiene mucho que decir en cuanto a temas medioambientales y a continuación se citan algunos de los puntos que acercan ambas temáticas:

- En primer lugar decir que la Nanotecnología va vinculada a procesos productivos donde la cantidad de material que se usará para construir objetos es mínima, debido a que el control nanométrico en las fases de producción permitirá construir con los componentes indispensables. De esta manera se consolidarán métodos de producción de menor impacto medioambiental, donde se ahorren materias primas y recursos energéticos.
- La Nanotecnología se enfocará a la creación de nuevos materiales, de excelentes prestaciones mecánicas y menor peso, aunque también se podrán optimizar otras propiedades como el aislamiento térmico o el apantallamiento de ondas electromagnéticas. Estos nuevos materiales permitirán desarrollar vehículos de transporte de superficie, aéreos y espaciales más ligeros, disminuyendo el consumo de combustibles fósiles. Entre los materiales que serán desarrollados sobre base nanotecnológica destacan aquellos dedicados al almacenamiento energético (nuevas baterías) o de hidrógeno. El desarrollo de estos materiales implicaría la desaparición paulatina de los actuales motores de combustión, disminuyendo la polución en ciudades.
- La Nanotecnología va a permitir desarrollar a corto plazo sensores minúsculos, que se producirán de forma masiva y tendrán un bajo coste. Estos sensores se incorporarán a nuestra vida cotidiana en miles de aplicaciones. En relación con el medioambiente, los “nanosensores” van a ser piezas clave, ya que permitirán un control en tiempo real de la calidad de las aguas (lagos, ríos, mares) y de la atmósfera. Esta vigilancia se logrará mediante la implantación de extensas redes de sensores de diversos tipos que alertarán sobre vertidos, accidentes químicos, escapes, e incluso incendios, permitiendo acciones de contención rápidas (quizás también basadas en desarrollos nanotecnológicos). Estas redes de sensores también controlarán posibles ataques químicos o biológicos. Las redes de sensores podrán controlar las condiciones medioambientales en edificios, fábricas, etc, aumentando la seguridad laboral o doméstica.
- Otro aspecto crítico está relacionado con el desarrollo de catalizadores. El mercado de catalizadores es inmenso (10.000 millones de dólares al año) lo que da idea de su implantación en todas las fases de los procesos productivos. La optimización de los catalizadores es crucial para maximizar la producción de derivados del petróleo. También los catalizadores están directamente relacionados con la eliminación de productos nocivos en la combustión de derivados del petróleo. Esta combustión también será optimizada mediante el uso de nuevos materiales en motores y la mejora de los sistemas de control (sensores) de la combustión.
- Para finalizar este breve recorrido por las cuestiones medioambientales resaltaré una que interesa a países como España y a todos los amenazados por la desertificación e interesados en la gestión inteligente de los recursos hídricos. La ciencia tiene mucho que decir sobre el tratamiento del agua y la Nanotecnología supondrá un cambio radical en la forma de abordar el problema. La fabricación de materiales porosos adecuados permitirá utilizar el nanofiltrado para desalinización y depuración de aguas. La generación de materiales diseñados para emular el funcionamiento de membranas celulares también permitirá tratar aguas con contaminantes específicos.

Termino este apartado sin profundizar en otros temas de corte medioambiental y relacionados con la Nanotecnología, como el uso de tejidos que no se ensucian ni se impregnan de olores, la fabricación de materiales más eficientes para transformar la energía solar o eólica en energía eléctrica, el aumento de la longevidad de los dispositivos debido a la mejora de la calidad de la producción, etc.

Lo que debe quedar claro es que cada una de las facetas de nuestra vida cotidiana va a quedar alterada en una o dos décadas por los desarrollos provenientes de la Nanotecnología, al igual que nuestra vida ha quedado marcada en los últimos veinte años por la llegada de la Microelectrónica, la Informática y las Telecomunicaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) “*Diccionario de la Lengua Española*”, Real Academia Española (1992).
- (2) N. Taniguchi, “*On the Basic Concept of Nanotechnology*”, Actas de la ICPE (International Conference on Production Eng.) Tokyo, pp 18-23 (1974).
- (3) A. Franks, “*Nanotechnology*”, Journal of Physics E: Scientific Instrumentation 20, pp 1442-1451, (1987).
- (4) G. Stix, “*¿Ante una nueva revolución?*”, Investigación y Ciencia, Vol. 237, pp. 74-79 (1996); G. Stix, “*Little Big Science*”, Scientific American, Vol. 285, nº 3, pp 32-37 (2001).
- (5) K. Eric Drexler, “*Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*” Anchor Press, New York (1986).
- (6) K. Eric Drexler, “*Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing and Computation*”, John Wiley, New York (1992).
- (7) Arturo M. Baró, en este mismo número de la revista “*Encuentros Multidisciplinares*”.
- (8) Tomás Torres, en este mismo número de la revista “*Encuentros Multidisciplinares*”.
- (9) La documentación sobre la Iniciativa Nacional en Nanotecnología (NNI) de los EE.UU. se puede encontrar en la página web <http://www.nano.gov>. En particular podemos citar los documentos i) “*Nanotechnology Research Directions: IWGN Workshop Report: A vision for Nanotechnology R&D in the next decade*”, National Science and Technology Council, September (1999); y ii) “*National Nanotechnology Initiative. Supplement to the President’s FY2001 Budget*”, National Science and Technology Council (2000).
- (10) “*Physics Update*”, *Physics Today*, número de Junio de 2000.
- (11) En 1945 entró en funcionamiento el sistema ENIAC con 17.468 válvulas o triodos de vacío, ocupando centenares de metros cuadrados, consumiendo 100.000 vatios y capaz de sumar 5000 números en un segundo. En 1951 se comercializó el sistema UNIVAC decenas de veces más potente y más pequeño pero también basado en válvulas. Para encontrar más información consultar por ejemplo D.H. Sanders, “*Computers Today*” McGraw-Hill (1983).
- (12) Escribiendo para la revista *Electronics* en 1965, Gordon Moore (co-fundador de Intel) hizo la observación de que en los últimos tres años el número de componentes integrados sobre un chip de silicio se había doblado anualmente. En aquel momento el número de componentes por chip era de 50. Moore anunció que esa tendencia duraría otros 10 años hasta llegar a 65.000 componentes por chip (número fascinante entonces). La Ley de Moore se ha cumplido hasta la actualidad, aunque el número de componentes se duplica cada 18 meses. En la actualidad cientos de millones de componentes se integran en un chip.
- (13) En la página Web http://www.techfak.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat_en/makeindex.html el Prof. H. Föll de la Universidad de Kiel detalla aquellos factores más importantes que pueden alterar la Ley de Moore.
- (14) R.P. Feynman, “*There’s Plenty of Room at the Bottom*”, en la publicación colectiva “*Miniaturization*” editada por H.D. Gilbert, Reinhold Publishing Corp N.Y., pp 282-296 (1961). También se encuentra una transcripción de dicho seminario en <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>.
- (15) En <http://coral.t.u-tokyo.ac.jp/roche> y <http://www.onr.navy.mil/onrasia/gnrl/nano.html> se pueden encontrar datos sobre la situación de la Nanociencia en la región de los países asiáticos más industrializados.
- (16) En la página web <http://www.cordis.lu/ist/fetnid.htm> se puede encontrar toda la información sobre la iniciativa NID.
- (17) Toda la información sobre la actividad de la Unión Europea en el área de la Nanotecnología se encuentra en la página web <http://www.cordis.lu/nanotechnology>.

- (18) Todos los documentos relacionados con el Plan Nacional de I+D+I para el periodo 2000-2003 se encuentran en http://www.mcyt.es/sepct/PLAN_I+D/pnididocu.htm .
- (19) La Red NanoSpain está coordinada desde el Consejo Superior de Investigaciones Científicas y la PYME dedicada a I+D CMP-Científica. Más información sobre la Red NanoSpain se puede encontrar en <http://www.cmp-científica.com>.
- (20) A modo de ejemplo, indicar que en el último año el periódico El País ha publicado más de treinta noticias o artículos de opinión relacionados con la Nanotecnología. A su vez, este tema ha sido portada de la revista Muy Interesante (Marzo 2002, nº 250).
- (21) En la página web sobre la Iniciativa Nacional en Nanotecnología (NNI) de los EE.UU. (<http://www.nano.gov>) se puede encontrar el documento “*Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*”. National Science Foundation (2001). Este documento contiene una extensa discusión sobre el impacto de la Nanotecnología en la sociedad.
- (22) R. Marco Cuellar y J.J. Sánchez Inarejos, “*Reflexiones en torno al desarrollo sostenible y el devenir del ser humano*”, Encuentros Multidisciplinares nº 11, vol. IV (2002).