

# Nanotecnología

Hernán Pablo Pecile \*

## Antes de comenzar

Los nuevos métodos de construcción *bottom-up* (desde lo más pequeño hacia lo mas grande), contrarios a los tradicionales utilizados por el hombre, pueden circunscribirse dentro de lo que es la nanotecnología.

“Nano” es la un mil millonésima parte de algo, es decir  $0,0000000001$  ó  $1 \times 10^{-9}$  en notación exponencial. La nanotecnología son aquellos desarrollos a nivel nanométrico. También podremos referirnos a esta como electrónica molecular.

Para tener acabada idea del nivel de miniaturización al que me estoy refiriendo, veamos el siguiente comparativo:

---

1 ribosoma mide 25 Nm <sup>1</sup>
1 célula mide 200.000 Nm
1 hormiga mide 10.000.000 Nm
1 persona mide 2.000.000.000 Nm

---

Asimismo en 1 nanómetro cúbico caben aprox. 258 átomos de carbono. No obstante eso, la *figura 1* ensaya otro ejemplo: 100 Nm es a una pelota de fútbol lo que la pelota es a La Tierra.



*Figura 1 – Relación entre 100 Nm, una pelota y La Tierra<sup>2</sup>*

Ahora que tenemos noción de pequeñez a nivel nanoscópico, definamos formalmente nanotecnología:

**La nanotecnología es la manufacturación de cosas a partir del ensamblado y desensamblado de átomos y/o moléculas, con la ayuda de dispositivos nanoscópicos.**

---

\* Alumno de la Facultad de Ciencia y Tecnología de la Universidad de Palermo.

Comentarios a: [neins@puntoar.net.ar](mailto:neins@puntoar.net.ar)

Algunos fragmentos tienen destacados sus derechos de autor.

© 2001 Hernán Pablo Pecile.

Para actualizaciones de este artículo, hipervínculos a páginas de nanotecnología y correcciones o erratas, visitar: <http://200.55.24.132/nano/index.asp>

1. Nm = nanómetros

2. Extraído de: [http://www.nanogate.de/\\_english/homepage\\_html.htm](http://www.nanogate.de/_english/homepage_html.htm)

Esto que parece tan sencillo de definir, fue planteado por Richard Feynman (Premio Nobel 1965); “¡No me hablen de micro diapositivas, ni de filminas, quiero saber de mover átomos y formar configuraciones distintas con ellos, escribir con átomos!”. Existía ya en 1948 la idea en Feynman de que la miniaturización no era suficiente, no creaba perspectivas, por lo que antes o después se llegaría al límite.

La ley de Moore establece que el numero de transistores que pueden ser ubicados en un chip se duplica cada 18 meses, llegando en algún momento al límite físico.

En 1986 Eric Drexler escribe su libro “*Engines of creation: the coming era of nanotechnology*” dando un primer paso en lo teórico y conceptual, ubicando a la ingeniería genética como primer nivel nanotecnológico.

La paradoja de la evolución y el sentido que esta adopta, en los comienzos construyendo maquinas enormes para manipular otras cada vez más pequeñas; ahora buscamos la forma de construir ensambladores nanoscópicos para que construyan máquinas mas grandes y complejas. El objetivo perseguido según Drexler y sus seguidores, es alcanzar el cero costo de los bienes, de la misma manera que una computadora manipula bits y genera con ellos información utilizando algoritmos adecuados.

Para que esto sea posible, será necesario primero desarrollar las micro y nano tecnologías para su manipulación. Más adelante daré cuenta de los avances en este sentido.

## ***Nanotecnología húmeda***

Mucho antes de empezar los estudios formales en nanotecnología o electrónica molecular, los ingenieros bioquímicos y sus colegas en genética aprendieron a copiar, cortar y pegar moléculas utilizando los principios de la química.

En un punto los bioquímicos se encontraron con la imposibilidad de manipular las moléculas libremente. Cuando combinaban moléculas en diversas secuencias, solo obtenían un control limitado de estas.

Las moléculas son como pequeñas maquinarias. Drexler lo explica tomando la definición de maquina: “cualquier sistema, usualmente de cuerpo rígido, formado y conectado para alterar, transmitir y dirigir fuerzas, aplicadas de una forma determinada, con el fin de cumplir un objetivo específico, como el de realizar un trabajo que tenga alguna utilidad”.

Cuando los químicos crean cadenas moleculares, llamadas polímeros, volcando en un vaso con un líquido a las moléculas donde las golpeaban para quebrarlas, obtenían otras cadenas de una gran variedad de largos que contenían moléculas estrujadas juntas pero sin un orden previo establecido.

Los ingenieros en genética desarrollaron métodos que nos mostrarán un camino más claro. En las modernas máquinas de síntesis genética, los ingenieros construyen polímeros (moléculas específicas del ADN) en forma mucho mas ordenada. Estas moléculas constituyen los nucleótidos del ADN (letras del alfabeto genético). El

mecanismo es en general, el siguiente (ver cuadro “ADN en detalle”): adicionando diferentes nucleótidos en una secuencia en particular, podrán hacer que la cadena emane un mensaje determinado. El agregado se hace al final de la cadena, sucesivamente, haciendo crecer a la misma. Si ocurriesen errores, éstos se auto-depuran, eliminando la cadena fallada.

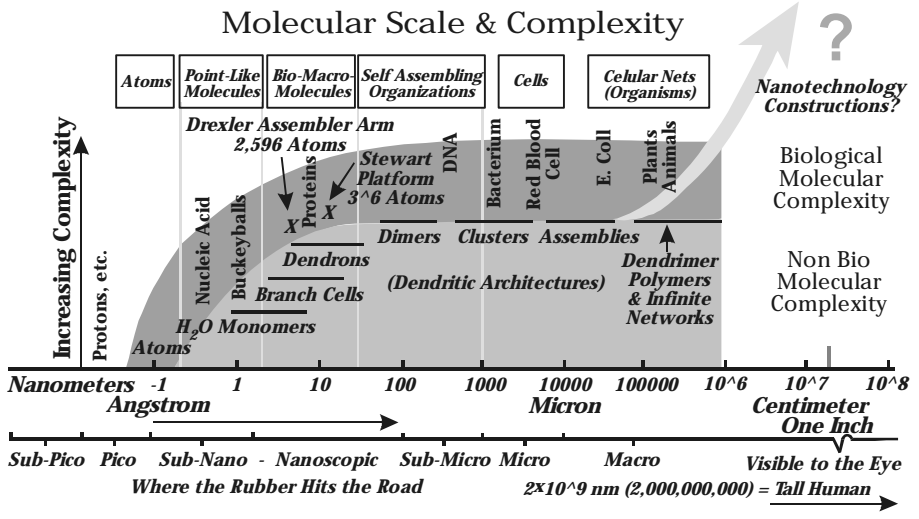


Figura 2 – Relación entre la complejidad molecular y el tamaño de las mismas

A su vez, las máquinas proteicas, llamadas enzimas restrictivas, son capaces de “leer” ciertas secuencias de ADN y “cortar desde un punto”. Otras son las enzimas capaces de “pegar desde un punto”. Usando estas maquinas para crear, leer, cortar y pegar cadenas, los ingenieros en genética pueden escribir cualquier mensaje de ADN.

Este proceso que se encuentra en la naturaleza ha sido estudiado para la futura aplicación en la construcción de nano máquinas.

(ver “Biocomputadoras”)

Pero, y siempre hay un pero, las moléculas se queman si las acercamos al fuego, se congelan si las temperaturas son extremadamente bajas, o se cocinan si las calentamos. Por lo que el desarrollo de los dispositivos nanotecnológicos está más ligado a la ingeniería. Así como lo hemos hecho con una gran cantidad de maquinaria para mover materia prima para la construcción de nuestro mundo, el punto de éxito en este campo será el desarrollo de maquinaria que pueda manipular átomos. Desarrollar las bases como ser engranajes, motores, poleas y ensambladores, desensambladores para así construir máquinas más complejas aún.

Una máquina podría, utilizando un principio de funcionamiento similar al de la enzima, adicionar capa tras capa de átomos de carbón para formar una fibra de diamante de extraordinarias propiedades.

## **Replicación**

Consideremos la masificación: con un solo agente nanoscópico el tiempo de construcción podría no ser el deseado. Es aquí donde aparece una de las ventajas más notables, la replicación.

Al igual que el ADN, los agentes nanoscópicos deberán poder replicarse, para poder cumplir con su misión en un tiempo razonable. Nuestro ADN en la mayor parte de los casos, sabe poner un límite a sus réplicas y deja de crecer; una excepción podría ser el cáncer, donde las células llevan consigo instrucciones muy específicas y distintas a las de su alrededor.

Cabe preguntarse si nuestros agentes podrán determinar sus límites y no terminar en la pesadilla descrita por Bill Joy en la revista “*Wired*” de abril de 2000.

### ***Biocomputadoras y ADN:***

Las biocomputadoras utilizarán el ácido desoxirribonucleico (ADN), el elemento presente poseedor de la cadena genética, presente en los seres humanos y animales, para hacer los cálculos en forma mucho más rápida y para almacenar enormes cantidades de información en espacios minúsculos. Actualmente, hay media docena de laboratorios en todo el mundo trabajando para desarrollar las biocomputadoras. Los expertos aseguran que un gramo desecado de ADN permitiría almacenar la información equivalente a la que guardarían un millón de millones de CD-ROM. Cada molécula de ADN está conformada por cuatro elementos: adenina (A), timina (T), citosina (C) y guanina (G). ¿Qué hacen las biocomputadoras? Codifican los datos según la combinación química de esos cuatro elementos. Las actuales computadoras utilizan el código binario (ceros y unos) para efectuar las operaciones. Las biocomputadoras aprovechan las múltiples combinaciones que naturalmente se producen entre los elementos A-T y C-G. Los expertos someten a las biocomputadoras a exigencias complejas aprovechando las capacidades del ADN para combinarse en forma natural. De esa manera, pueden resolverse complejos problemas en cuestión de micro o nano segundos. Una tarea que a las computadoras actuales podría llevarle muchas horas de trabajo. En la etapa actual de las biocomputadoras, las pruebas se realizan en laboratorios. Y el ADN contenido en litros de material genético se almacena en tubos de ensayo. El próximo desafío es pasar del material líquido al sólido.

“Por ahora no creo que las biocomputadoras reemplacen a las digitales. Pero con los últimos avances, seguramente en el futuro se concretará”, aseguró el doctor Lloyd Smith, un experto de la Universidad de Wisconsin que trabaja en el desarrollo de biocomputadoras.

Joy, jefe científico de *Sun Microsystem*, estableció los riesgos en la capacidad de autoréplica de los agentes. Como en un programa de computación donde no está bien definida la sentencia de final, él confía en que los accidentes en este sentido podrían ser catastróficos. La velocidad exponencial calculada de proliferación de un agente sin autocontrol y su propia capacidad de réplica fundamentan estos temores.

Joy nos decía que a diferencia de una reacción nuclear donde el efecto de propagación tiene un área limitada en un tiempo determinado, los agentes pueden “contaminarlo” todo en cuestión de minutos.

Así como virus informáticos en cuestión de horas cruzan el planeta dejando equipos en dificultoso funcionamiento, extrapolar los efectos de un agente descarriado no es un imposible.

Es por esto que muchos científicos insisten en la necesidad de que estos agentes posean inteligencia, estén dotados del conocimiento necesario para llevar a cabo la tarea y puedan aprender del medio en el que actúan, así como poner fin a su propia existencia.

Actualmente estos agentes no existen, para la tranquilidad del lector, pero confían que el proceso para su fabricación esta decididamente en marcha.

El estado actual del desarrollo permite reubicar átomos y crear estructuras básicas como los nanotubos, que veremos mas adelante.

## ***Las herramientas***

He sido insistente en el carácter ascendente de esta tecnología (*botton-up*) y de lo importante de desarrollar herramientas para manipular los átomos y moléculas. Veamos pues cuales son:

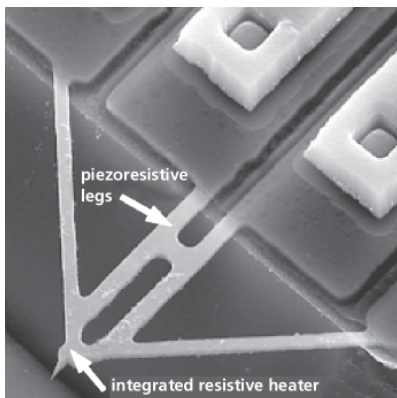
### **i. Atomic Force Microscopy (AFM)**

Desarrollado a partir de la necesidad de vencer los límites físicos actuales en densidad de datos.

La tecnología del AFM está relacionada con otra llamada *Scanning Tunneling Microscopes* (STM), que puede leer y escribir superficies a escala atómica.

Opera a temperatura ambiente y condiciones atmosféricas normales; el AFM tiene la capacidad de leer y escribir información de densidad mayor a 300 giga bits por pulgada cuadrada. Esto representa un claro incremento de los 20 a 50 giga bits por pulgada cuadrada donde existen actualmente problemas de estabilidad en los medios magnéticos convencionales.

La grabación de los datos se realiza sobre un disco plástico giratorio, haciendo pequeñas marcas sobre el mismo, previo calentamiento repentino de la superficie. La punta grabadora mide unos 10 micrones de largo y su punta es de 40  $\text{Ångstrom}^3$  de radio.



*Figura 3 - Detalle de la punta del AFM*

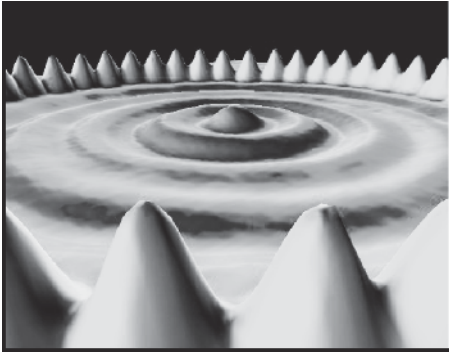
---

3.  $\text{Ångstrom}$ : un  $\text{Ångstrom}$  es aproximadamente el radio de un átomo.

## ii. Scanning Tunneling Microscopy (STM)

El STM puede dibujar algunos tipos de átomos individuales sobre superficies con conductancia eléctrica. Por esto, sus inventores ganaron el premio Nobel. Unos años después científicos del Centro de Investigaciones Almaden de IBM, lograron por primera vez mover y posicionar con precisión átomos en forma individual.

Don Eigler de IBM publicó una galería con imágenes obtenidas con el STM.<sup>4</sup>

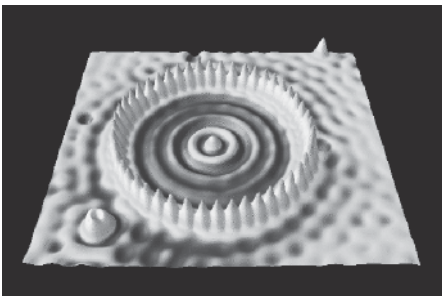


*Figura 4 - El corral*

En la figura 4 se han posicionado 48 átomos de hierro en forma de círculo para crear un corral y así rodear ciertos electrones en determinado estado y forzarlos a un estado cuántico dentro de la estructura circular. Las ondulaciones dentro del aro circular representan cierta distribución de densidad de un grupo particular de estados cuánticos del corral.

Estos posicionamientos de átomos se realizan a muy bajas temperaturas, pero ya se está trabajando a temperatura ambiente. Las moléculas seleccionadas deben ser lo suficientemente resbaladizas para poder ser empujadas y movidas por la punta del STM y a su vez lo suficientemente pegajosas para permanecer en su lugar una vez que la punta la haya ubicado. La unión química dentro de la molécula debe resistir el quiebre de la misma o su alteración cuando esta es empujada.

Fue utilizada una molécula orgánica de 173 átomos.



*Figura 5 – Otra perspectiva del “corral”*

4. <http://www.almaden.ibm.com/vis/stm/gallery.html>

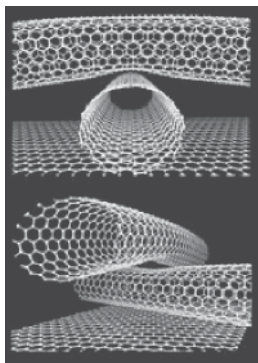
## **Carbon Nanotubes**

Uno de los más importantes desarrollos al momento en nanotecnología son los nanotubos de carbón.

### **i. ¿Qué es un nanotubo de carbón?**

Son 10.000 veces mas pequeños que un cabello humano. Consiste en hojas formadas por hexágonos de carbón enrolladas. Científicos de NEC las desarrollaron en 1991 descubriendo un gran potencial en la fabricación de ultra-delgados cables para dispositivos ultra-pequeños electrónicos.

IBM utilizando su AFM, logro modificar su dimensión, orientación y forma, además de poder cortarlos.



*Figura 7 – Nanotubos*

Las investigaciones encontraron en las fuerzas de van der Waals<sup>5</sup> mantienen los nanotubos firmes sobre las superficies donde son depositados. Doblándolos fue posible cambiar sus posiciones y orientaciones como así mismo alterar su forma. Usando fuerzas calibradas en el AFM fue posible realizar esto. Pero para cortarlos fue necesario utilizar fuerzas en particular muy fuertes.

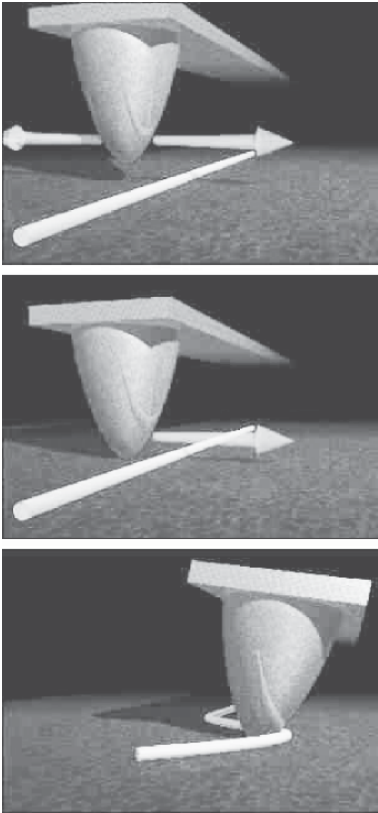
Estos estudios llegaron a la conclusión de que el nanotubo y la superficie donde este descansa y la interacción de ambos a través de las fuerzas de van der Waals es lo suficientemente fuerte como para cambiar la forma de los nanotubos y así llegar a cortarlos.

En la figura 8, se describe como el AFM es usado para doblar los nanotubos.

Primero a través del AFM se escanea el nanotubo para ver su forma. Seguidamente se baja la punta del AFM hasta la superficie donde descansa el nanotubo. Finalmente y debido a que las fuerzas de van der Waals procuran que el nanotubo mantenga su forma por la “adherencia” a la superficie, éste es empujado y así, doblado.

---

5. Las fuerzas de van der Waals son aquellas que existen entre moléculas del mismo tipo de sustancia. Por ejemplo en el agua, se dice que estas fuerzas son aquellas entre las miles de millones de moléculas separadas o no, que existen; y no entre sus átomos de hidrógeno y oxígeno.



*Figura 8 - A través del AFM se dobla el nanotubo*

## ii. Transistores de nanotubos de carbón

En el campo de la evolución de los chips para computadoras, los nanotubos tienen hoy la última palabra. Los avances en la tecnología de transistores construidos con nanotubos, pueden modificar próximamente el tamaño y potencia de los equipos de computación.

En el reporte del 27 de abril de 2001 de un magazín científico, investigadores de IBM afirman haber construido el primer conjunto de transistores fuera de un nanotubo de carbón que mide 10 átomos y es 500 veces mas pequeño que los transistores actuales basados en silicio, además de ser 1000 veces mas resistente que el acero. El proceso supera su predecesor que manipulaba un nanotubo a la vez y era muy lento.

Este método solucionará un problema previsto para dentro de 10 a 20 años cuando los chips de silicio no puedan miniaturizarse mas. (ley de Moore)

Los nanotubos exhiben 2 tipos tecnológicos: los metálicos, que pueden transportar altas densidades de corriente y los semiconductores que pueden funcionar como switches eléctricos de encendido y apagado y pueden comportarse como un transistor. Desafortunadamente no existen métodos para la fabricación de ellos por separado, por lo que se ha desarrollado una técnica llamada de "construcción destructiva".



Este método desactiva los nanotubos semiconductores dejando a los metálicos desprotegidos y luego con la aplicación de una tensión que destruye solo a los metálicos.

Para mas detalles consultar el paper: "Engineering Carbon Nanotubes and Nanotube Circuits Using Electrical Breakdown" por P. G. Collins, M. S. Arnold, y Ph. Avouris.

<http://www.research.ibm.com/nanoscience/publications.html>

## ***State-of-Art***

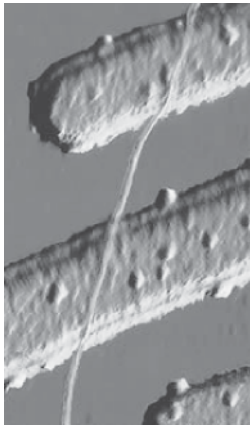
### **i. Circuitos en "entrenamiento"**

28 de febrero de 2001 - Philip Ball - © Nature

Que los robots puedan ensamblar por si mismo circuitos partiendo de componentes mas pequeños que una bacteria, deja de ser una visión de ciencia ficción.

Un equipo de universidad estatal de Pennsylvania, uso el ADN para estimular hilos de oro de 1 millonésimo de milímetro de ancho a tomar determinadas posiciones sobre una superficie también de oro, provocando el auto-cableado dentro de los límites posibles.

Se moldearon hilos (nanohilos) de oro de 200Nm de ancho por 6000Nm de longitud, dentro de un estrecho canal en el poro de una membrana, y los identificaron con pequeños hilos de ADN.



Cubrieron la capa de oro con hilos de ADN, que se complementaban con algunos de los nanohilos. Observando la mecánica de complementación que tiene el ADN, (ver apartado ADN), cuando un hilo ADN encontraba otro provocaba que los hilos de oro se pegaran a la superficie. Aquellos hilos cuya hebra de ADN coincidía con aquella otra en la superficie del oro, se pegaban 4 veces mas rápido que aquellas que no eran complementarias en sus etiquetas ADN.

La discriminación no es perfecta aún, porque aquellos hilos que perdieron sus etiquetas o no fueron etiquetados también presentan una leve tendencia a pegarse.

Los investigadores aun esperan hacer auto-cableado de circuitos electrónicos, usando superficies con etiquetas ADN para guiar a los componentes en un sentido.

### **ii. Haz de electrones sueldan nanohilos de carbón**

22 de junio de 2001 - Philip Ball - © Nature

En la universidad de Ulm en Alemania usaron haces de electrones para unir dos tubos huecos de carbón (carbón nanotubes) a través de 2 millonésimas de milímetro. Mientras que los fabricantes de microchip se esfuerzan por crear cableados 10 veces mas pequeños que el silicón, los nanotubos de carbón forman componentes espontáneamente de gases ricos en carbón. Estos conducen electricidad y pueden actuar como transistores u otros dispositivos electrónicos.

De poder conectarlos, se podría, de un golpe achicar la microelectrónica y aumentar el poder computacional enormemente.

Dos cables conducen electricidad por simple contacto, pero los nanotubos no funcionan de esta manera, debido a que son demasiado pequeños. De hecho conducen con gran ineficiencia.

Para salvar esto, el equipo de Florian Benhart enfoco un haz de electrones sobre el punto donde los nanotubos se cruzan. Los nanotubos levantan los contaminantes que contienen carbón sobre su superficie cuando son expuestos al aire. El haz electrónico convierte eso escombros entre los nanotubos a un tipo de grafito carbónico que es conductor, y como una soldadora, fija un tubo al otro.

Ambos nanotubos cilíndricos permanecen desconectados, como 2 vías de subterráneo separadas por túneles, que corre una sobre la otra. Cortando los tubos en 2 y juntando sus terminaciones entre si, se forma un túnel de 4 vías que tendrá un efecto diferente sobre la conductividad, la cual podría ser útil para la electrónica.

### ***Nanotecnología made in ARG***

La empresa *Motorola* afirma haber hecho una inversión que ronda los \$ 100.000 en el campo de la electrónica molecular y ha elegido a la UBA como socia para esta investigación. Uno de sus investigadores es el doctor Ernesto Julio Calvo, secretario de Investigación y Planeamiento de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.

La primer parte del proyecto de *Motorola* es científico y apunta a la comprensión del proceso electroquímico a escala nanométrica. La segunda parte es el desarrollo un transistor molecular en el que los conductores son polímeros de cinco a diez nanómetros de diámetro.

### **Un mismo objetivo: El primer nanoensamblador**

Sería el primer dispositivo capaz de contener la información para recrearse a sí mismo y de esta forma, dar un viraje de 180 grados en todo lo que a producción de bienes se refiere, abriendo una nueva puerta hasta los límites de la imaginación humana.

Tendremos así maquinas capaces de autoconstruirse y aprender de si mismas con capacidades solo soñadas.

Si bien la replicación sin control aparece como un grave riesgo, también lo son los mecanismos de manipulación genética y un profundo entendimiento del genoma humano. La clonación es un ejemplo de estos días.

En genética la recombinación del código entre virus para crear otro es una práctica habitual en los laboratorios. Se extreman las medidas de seguridad, pero parece que nunca son suficientes.

La nanotecnología no escapará a los riesgos inherentes a su desarrollo, pero debemos tener en cuenta, nuestra capacidad imaginativa y sobre todo, nuestro instinto de supervivencia que nos ha llevado hasta este punto, y mucho mas.



