

¿Qué es la nanomecánica?

Podemos definir la nanomecánica como el estudio del movimiento en la escala nanométrica. La nanomecánica, por tanto, es transversal a muchos campos de la física. Este hecho hace que disciplinas tan dispares como la hidrodinámica, que estudia los fluidos; o la óptica, que estudia el comportamiento de la luz, tengan un punto de encuentro en la nanomecánica, que permite dar respuesta a preguntas como, por ejemplo, ¿cómo se pesa un átomo?, ¿cómo se miden las interacciones entre las moléculas?, ¿cómo funciona un acelerómetro de un teléfono móvil?, ¿pueden tener olfato los robots?, ¿qué tienen en común las ondas gravitacionales entre las galaxias con las balanzas atómicas? A lo largo de estas páginas vamos a intentar contar de forma sencilla y de la manera más amena posible cómo y cuándo surge el campo de la nanomecánica, así como explicar a través de diferentes ejemplos cómo funcionan los sensores nanomecánicos y los retos para el futuro.

Lo primero que debemos tener en cuenta es que la nanomecánica es una rama de la nanotecnología. El término “nanotecnología” engloba todas aquellas ciencias aplicadas al control y manipulación de la materia en la escala de los nanómetros, es decir, la milmillonésima parte de un metro o, lo que es lo mismo, $0,000000001$ m. “Nano” es un prefijo griego que significa “pequeño”, indica, por tanto, una medida, no

un objeto; de manera que la nanotecnología se caracteriza por ser un campo esencialmente multidisciplinar, al comprender todas aquellas disciplinas que tienen en común únicamente el tamaño. La palabra “nano-tecno-logía” es multidisciplinar en sí misma, hace referencia al conocimiento (-logía) y técnicas (-tecno-) de lo pequeño (nano-).

La nanotecnología promete soluciones nuevas y más eficientes para los problemas a los que se enfrenta la sociedad moderna, como la contaminación ambiental, aplicaciones biomédicas o nuevas formas de obtención de energías renovables. Para comprender el potencial de esta tecnología es importante saber que las propiedades físicas y químicas de la materia cambian a escala nanométrica. Estas nuevas propiedades no solo derivan de efectos cuánticos más o menos exóticos, sino de otros muchos que se suelen considerar despreciables cuando se trabaja en escalas mayores, como los efectos de superficie. Y es que la relación superficie/volumen aumenta considerablemente cuando reducimos la escala, lo que tiene efectos, entre otros, en las reacciones químicas. Para entender esto, pensemos en un ejemplo muy sencillo de reacción química: comparemos cuánto tarda en disolverse un terrón de azúcar (que es “grande”) comparado con una cucharada de azúcar en polvo (donde cada grano de azúcar es “pequeño” o, si queremos, “nano”). Al echarlo en el café podemos ver que, pese a ser la misma cantidad, el terrón de azúcar tarda mucho más en disolverse. Esto es debido a que la relación superficie/volumen aumenta en el azúcar en polvo, hay más superficie por el mismo volumen, y como la reacción química sucede en la superficie de contacto con el agua, se disuelve antes. Del mismo modo, la conductividad eléctrica y térmica, la elasticidad o la fricción se comportan de manera diferente cuando se reduce el objeto a la nanoescala. Otro ejemplo relacionado con la nanomecánica se observa en las propiedades mecánicas del óxido de silicio. Lo que comúnmente conocemos como vidrio está compuesto en su mayoría por óxido de silicio o sílice y todos sabemos por propia experiencia lo frágil que es el vidrio de una ventana o un vaso. Sin embargo,

cuando se fabrican estructuras nanométricas de óxido de silicio se observa que se pueden doblar muy fácilmente alcanzando ángulos imposibles sin llegar a romperse.

El origen de la nanotecnología suele atribuirse, al menos de forma meramente especulativa, al ganador del Premio Nobel de Física Richard Feynman, pionero en hacer referencia a las posibilidades de la nanociencia y la nanotecnología en su célebre discurso de la American Physical Society, “*There’s plenty of room at the bottom*”, el 29 de diciembre de 1959, donde vaticinaba que la manipulación a escala atómica y molecular tendría un gran impacto en las propiedades de los materiales. Sin embargo, habría que esperar hasta 1974 para que el científico japonés Norio Taniguchi acuñara el término *nanotecnología*. Finalmente, en 1981, Eric Drexler publicó un artículo científico sentando las bases de la manipulación molecular.

Es en 1981 cuando Gerd Binnig y Heinrich Rohrer, que trabajaban para IBM en Zúrich, construyen el primer microscopio de efecto túnel (*scanning tunneling microscope*, STM), que permite la manipulación en la escala nanométrica. No obstante, hay que destacar que el camino seguido hasta el STM parte de los años sesenta, con la emisión de campo, y que apenas unos años antes de la invención del STM se demuestra por primera vez la corriente túnel. En el año 1983 se produce la primera demostración de resolución atómica utilizando un STM para visualizar átomos de oro sobre una superficie de silicio.

Casi en paralelo, a mediados de los años ochenta se produce un descubrimiento que cambia el concepto de manipulación molecular, los fullerenos, la tercera forma estable conocida del carbono (las otras dos son el grafito amorfo y el diamante) y que incluye las *buckyballs* (en forma de bola, compuestas por pentágonos y hexágonos, como un balón de fútbol), los nanotubos de carbono y otros polímeros de carbono. El descubrimiento de esta molécula y el perfeccionamiento de la técnica de síntesis en el laboratorio abren una nueva vía de estudio, la manipulación molecular, que ha dado

como resultado importantes avances en ciencia de materiales, como los mencionados nanotubos de carbono o el grafeno, y todos los materiales bidimensionales.

Gerd Binnig y Heinrich Rohrer ganaron el Premio Nobel de Física en el año 1986 junto con el científico alemán Ernst Ruska, inventor del microscopio electrónico de barrido (*scanning electron microscopy*, SEM). Fue precisamente en 1986 cuando el propio Binnig, junto con otros dos colaboradores —Christoph Gerber de la Universidad de Basilea y Calvin Quate de la Universidad de Stanford—, publica la invención del microscopio de fuerzas atómicas (*atomic force microscopy*, AFM), lo que se considera el nacimiento de la nanotecnología.

¿Qué tienen en común el microscopio de fuerzas atómicas y el microscopio de efecto túnel?

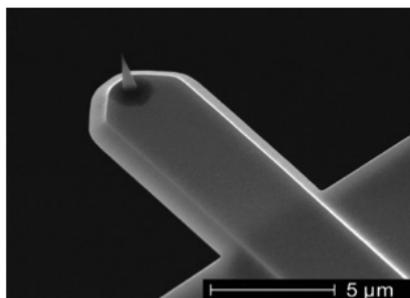
El principio básico del funcionamiento de ambos microscopios es el mismo: una punta muy afilada, de unos pocos nanómetros, interactúa con la superficie que queremos estudiar. Esta punta o “sonda” es lo que da nombre a este tipo de microscopía, que se conoce como *microscopía de sonda local*, y el estudio de su movimiento es lo que da origen a la nanomecánica que estudia el movimiento en la escala nanométrica y nos permite visualizar y manipular átomos individuales.

En el caso del STM, la punta no llega a tocar la superficie, pero se sitúa muy cerca, tan cerca que somos capaces de hacer pasar una corriente eléctrica desde la punta hasta la superficie. Los electrones que forman esa corriente tienen que “saltar” desde la punta hasta la superficie. Este efecto se conoce como *corriente túnel*, ya que los electrones atraviesan una barrera de potencial, de ahí el nombre del microscopio. La corriente que medimos depende mucho de la distancia de la punta a la muestra, por lo que midiendo la corriente somos capaces de inferir o “ver” la rugosidad de la superficie compuesta por átomos.

El microscopio de efecto túnel ha llegado al límite de resolución atómica, es decir, podemos “ver átomos individuales” —técnicamente hablando visualizamos la *función de onda* de los electrones que componen el átomo—, así que es el microscopio de mayor resolución de los que disponemos actualmente. Pero presenta un serio problema: la muestra que queremos ver tiene que ser un conductor eléctrico para poder medir la corriente. Es por ello que unos años más tarde se presentó una versión apta para cualquier material, el microscopio de fuerzas atómicas o AFM. La idea es la misma, pero esta vez la punta toca la superficie. Desplazamos la punta sobre la muestra que queremos inspeccionar y, a partir de sus movimientos, podemos “ver”; es como si leyésemos un libro escrito en braille, donde nuestros dedos se sustituyen por la punta.

FIGURA 1

Imagen de microscopía electrónica de barrido o SEM de una punta de AFM en el extremo de una micropalanca flexible de silicio.



Ambas técnicas, el STM y el AFM, nos permiten ver y manipular los objetos en la escala nanométrica, pero surge entonces un problema: ¿cómo podemos detectar el movimiento de la punta si se está moviendo distancias atómicas? Es aquí donde entra en juego la nanomecánica. La idea es muy sencilla: colocamos la punta —que, recordemos, es diminuta— en el extremo de una palanca flexible de mayor

tamaño, del orden de medio milímetro. No podemos medir directamente el movimiento de la punta a causa de su tamaño, pero sí las deflexiones de la palanca sobre la que está pegada. Podemos situar entonces el origen de la nanomecánica en el estudio de los movimientos de esa micropalanca flexible.

Relevancia práctica de la nanomecánica

Muchas veces suele considerarse el desarrollo de la nanotecnología como la revolución industrial del siglo XXI, y no es para menos. Debido a la enorme importancia de la industria electrónica en la sociedad, en un primer momento, la atención de los investigadores se centró en la fabricación y estudio de los materiales semiconductores, como el silicio o el germanio. Fruto de ese esfuerzo ha sido el desarrollo de dispositivos primero microelectrónicos y posteriormente nanoelectrónicos, como los transistores, que han permitido el impulso del uso de microprocesadores y controladores para todo tipo de aplicaciones, desde telefonía móvil a satélites. Pero fue relativamente pronto, a mediados de la década de los ochenta, cuando los científicos se dieron cuenta de la inmediata conexión que existe entre la nanotecnología y la biología molecular, lo que abrió la puerta a todo un mundo nuevo lleno de posibilidades en forma de nuevas aplicaciones en biología y medicina aún por descubrir.

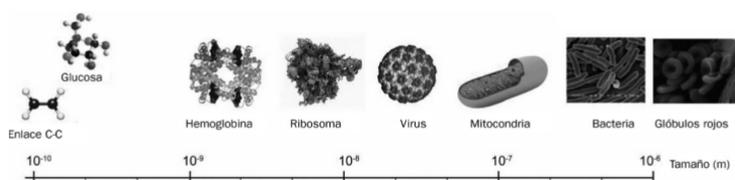
¿De qué tamaño es una molécula?

El tamaño de una molécula es de unos pocos nanómetros de diámetro, por lo que no se pudo estudiar y visualizar directamente hasta el nacimiento de los microscopios de sonda local (figura 2). Hasta entonces se trabajaba con datos indirectos derivados de la difracción de rayos X. Por tanto, el estudio de las moléculas biológicas entra dentro del rango de estudio de la nanotecnología. Este descubrimiento supuso un punto

de inflexión en cuanto a la concepción de los procesos biológicos mediados por distintos tipos de moléculas. Hoy en día, el estudio en el campo de las ciencias de la vida se centra en la investigación del mundo molecular, pues en este se encuentran posiblemente las alteraciones estructurales que provocan las diferentes enfermedades. Sin las herramientas desarrolladas por la nanotecnología no hubiera sido posible el estudio de moléculas individuales y su interacción. Otras ramas que componen la medicina moderna también se han visto beneficiadas por este tipo de estudios, como la microbiología, la inmunología o la fisiología.

FIGURA 2

Escala de tamaño de las entidades biológicas más importantes. La nanotecnología se integra perfectamente en los tamaños de las moléculas.



El desarrollo de los microscopios de sonda local tiene como consecuencia directa la fabricación de puntas y elementos flexibles que permiten visualizar átomos y moléculas e interactuar con ellos, ya que son de un tamaño comparable. Tal y como hemos explicado, la punta se ve afectada por la molécula, se ve atraída o repelida por las fuerzas que existen entre la molécula y la punta, y la micropalanca flexible se dobla de forma proporcional a dichas fuerzas. Entonces, si somos capaces de “ver” una molécula a partir de las interacciones que sufre nuestra micropalanca, podemos decir que la micropalanca “siente” la presencia de la molécula. Esto abre todo un mundo de posibilidades, ya que a partir de ahora podremos decir si una determinada molécula está presente en nuestra muestra simplemente viendo los cambios que

produce en nuestra micropalanca, es decir, hemos creado un *sensor*, concepto que desarrollaremos en profundidad en sucesivos capítulos.

Más allá de los microscopios de sonda local. El origen de los sensores nanomecánicos

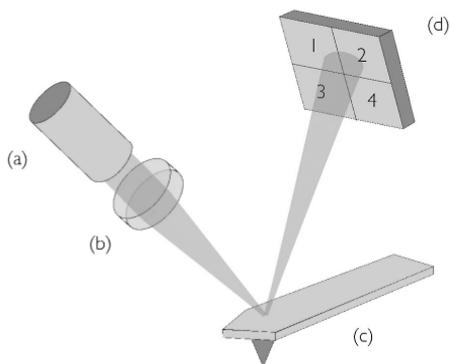
A mediados de la década de los noventa, los microscopios de sonda local, en concreto el AFM, habían ganado mucha popularidad, y se empezaban a utilizar en laboratorios de todo el mundo. Un microscopio de fuerzas atómicas no necesita una gran instalación, se puede utilizar a temperatura ambiente y presión atmosférica, incluso en líquidos, lo que lo hace muy interesante y accesible para muchos tipos de investigaciones diferentes. Recordemos que toda la información acerca de la superficie se detecta a través de la micropalanca. Es por esto que, una vez establecido y estandarizado el principio básico de funcionamiento, el esfuerzo se centra en estudiar el movimiento de dicha micropalanca. Una de las formas de detección más sensibles, aunque veremos otras alternativas más adelante, es la detección óptica mediante lo que se conoce como *técnica de deflexión de haz*, donde un láser se enfoca en el extremo libre de la micropalanca y su reflejo se analiza mediante un fotodetector, tal y como se muestra en la figura 3. El movimiento de la micropalanca se traduce en un movimiento del spot reflejado del láser, que medimos a través de la corriente eléctrica generada en el fotodetector. Con el fin de aumentar la señal del láser reflejado, se suele cubrir una de las caras de la micropalanca, que suele estar fabricada en silicio o algún derivado como el óxido de silicio o el nitruro de silicio, con una fina capa metálica reflectante, generalmente de oro, ya que no se degrada con facilidad, no se oxida y perdura en el tiempo.

Esta capa reflectante aumenta mucho la señal en el fotodetector, pero lleva asociados otros problemas. Los investigadores se dieron cuenta de que en la señal había “ruido y

derivas”. El ruido es de naturaleza aleatoria, no sigue una tendencia clara, pero una deriva es una variación de la señal con el tiempo, normalmente en escalas temporales grandes: minutos, horas o incluso a lo largo del día. La micropalanca tiene que ser muy flexible y fácil de fabricar. Normalmente tiene un extremo fijo, por el que se sujeta un chip, y un extremo libre, que es donde va situada la punta.

FIGURA 3

Sistema de detección óptica del movimiento de la micropalanca. (a) Láser, (b) lente para enfocar, (c) micropalanca reflectante, (d) fotodetector.

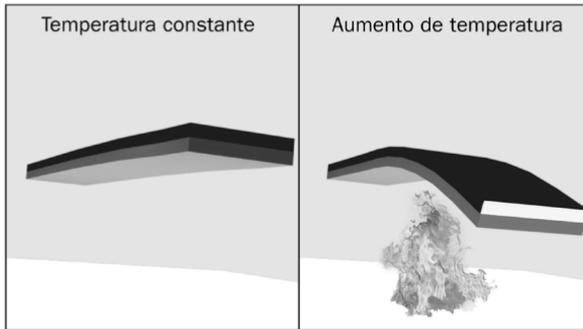


En 1994 un grupo de investigadores liderados por Thomas Thundat en los laboratorios Oak Ridge (Estados Unidos) observaron que estas variaciones de la señal que veían a lo largo del día se debían a fluctuaciones de la temperatura del laboratorio: por las mañanas la temperatura es baja, aumenta a lo largo del día y vuelve a bajar por la noche. Como la micropalanca flexible tiene dos materiales pegados, con un aumento de la temperatura el material con mayor coeficiente de expansión térmica (el metal) se expande más que el material de la micropalanca (generalmente silicio), pero al estar pegados, la micropalanca se dobla (figura 4). Relacionando cuánto se dobla la micropalanca en función de la variación de la

temperatura tenemos el nacimiento del primer sensor nanomecánico: un “termómetro nanomecánico”.

FIGURA 4

Esquema de funcionamiento del primer sensor nanomecánico: cuando se calienta una estructura formada por dos capas de diferente material, se dobla debido a la diferente expansión térmica.



Podemos aplicar este mismo principio a cualquier otro tipo de estímulo, no solo a la temperatura. Siempre que suceda algo diferente entre las dos caras de la micropalanca, esta se doblará y seremos capaces de detectar a través de su movimiento lo que está pasando. Por ejemplo, supongamos que sucede una reacción química solo en una de las caras, la cara del oro y no la del silicio, la micropalanca reaccionará a este cambio y podremos estudiarlo.

Con este descubrimiento, nos dimos cuenta de que la punta que se usaba para formar imágenes con microscopios de sonda local (AFM y STM) ya no era necesaria, se podía prescindir de ella. Esto abrió un mundo lleno de posibilidades en forma de nuevas geometrías. La nanomecánica ya no se limitaba a las palancas, se podían utilizar puentes, membranas o cualquier otra estructura suspendida. A esto se añade que las técnicas de fabricación han mejorado considerablemente, lo que ha permitido trabajar con otros materiales, como el diamante.

¿Cómo se fabrican estos dispositivos?

La fabricación de todos estos dispositivos se realiza en un ambiente limpio y condiciones controladas, en laboratorios especialmente equipados para ello que se denominan de forma genérica *sala blanca*. Esto es fundamental, las partículas de polvo en suspensión son generalmente más grandes que los dispositivos que queremos medir, por lo que tenemos que extremar el cuidado y las condiciones de limpieza. Un proceso de fabricación de una muestra puede llevar semanas; basta con que se deposite polvo de manera accidental para arruinar todo nuestro trabajo y echar a perder mucho dinero, ya que son procesos caros. Una sala blanca tiene dos partes fundamentales, el área de trabajo y el área de servicio. Los usuarios, científicos, ingenieros y técnicos de diferentes áreas, permanecen normalmente en el área de trabajo, mientras que el mantenimiento de la propia sala blanca se realiza en el área de servicio. Veamos ambas zonas por separado.

Área de trabajo

Es donde están las máquinas que usamos para trabajar, como los equipos de litografía, las campanas de química, los equipos de crecimiento de materiales, etc. Las normas de vestuario y de comportamiento son muy estrictas. No se puede entrar con ropa de calle, siempre se debe vestir un mono de cuerpo entero, con calzas cubrezapatos, botas sobre las calzas, una red para el pelo y una capucha sobre esta. Generalmente se usa una mascarilla, como la que usan los cirujanos en los quirófanos, unos guantes finos siempre puestos, y gafas para los ojos. Podemos pensar que todo este equipamiento es para protegernos de los agentes nocivos, pero no, es para preservar la limpieza de la sala blanca. Cuando se usan agentes potencialmente peligrosos para nuestra salud, encima de todo esto debemos llevar protección adicional (guantes gruesos sobre los finos, delantal sobre el mono y máscaras sobre las gafas obligatorias). Para hacernos una idea, tardamos unos 5 minutos

en equiparnos para poder entrar en el área de trabajo donde, por supuesto, no se puede introducir nada del exterior que no haya sido previamente limpiado exhaustivamente. Además de este equipamiento, dentro del área de trabajo no se puede gritar ni correr, porque esto genera corrientes de aire que pueden mover partículas de polvo y ensuciar una muestra, tampoco se pueden usar cosméticos que tengan un olor penetrante, como los perfumes.

Área de servicio

Una sala blanca necesita permanecer limpia y libre de polvo en todo momento. Para lograr esto no basta solamente con cubrir la ropa y limpiar aquello que se quiera introducir, sino que debemos filtrar el aire con grandes filtros de partículas. Estos filtros están en salas anexas al área de trabajo y constituyen una parte fundamental del funcionamiento de la sala blanca. Además de los filtros tenemos dos sistemas adicionales contra el polvo y las partículas en suspensión: la presión del aire y el flujo continuo. Desde el área de servicio se estará bombeando continuamente aire filtrado y libre de partículas en suspensión a la sala blanca, lo que hace que aumente la presión de aire dentro. Esto implica que cuando se abre la puerta haya siempre una corriente de aire de dentro a fuera, impidiendo que entre aire no filtrado. Como medida adicional está el bombeo de este aire desde el techo de la sala, de forma que haya un flujo continuo de aire filtrado. Esto hace que posibles partículas que introduzcamos dentro se queden pegadas al suelo y no estén flotando en el aire, lo que podría ensuciar y arruinar nuestro trabajo.

La descripción detallada de la fabricación de los dispositivos requeriría un libro entero en sí mismo, por lo que no pretendemos explicar todas las técnicas involucradas. Simplemente vamos a comentar que el proceso de fabricación depende del tipo de dispositivos, no existe un método universal de fabricación para todas las geometrías y todos los materiales. En ocasiones lleva meses de trabajo encontrar la forma

de fabricar aquello que hemos diseñado. De entre todas las técnicas, las más comunes incluyen procesos de litografía, en los que se deposita una resina sobre el material que queremos trabajar. Cuando exponemos esta resina a la luz (fotolitografía) o a los electrones (litografía electrónica), cambia sus propiedades, lo que nos permite dibujar un patrón. Este patrón se transfiere al material deseado con técnicas de ataque químico (ácidos o bases que reaccionan con los materiales) o ataque físico (bombardeo con iones que arrancan el material). El número de combinaciones entre estas técnicas es prácticamente infinito, lo que nos permite trabajar con una gran cantidad de materiales diferentes.