



: el futuro entre átomos

Eréndira Santana Suárez*, Bryan Daniel Herrera Lozada*, Enrique Cuauhtémoc Samano Tirado*

¿Alguna vez has pensado cómo será la tecnología en el futuro? Seguramente estarás recordando muchas de las escenas de películas de ciencia ficción que nos invitan a reflexionar un poco sobre el porvenir de la humanidad. No es difícil imaginar que dentro de algunas décadas nuestros medios de transporte serán vehículos que empleen energías limpias, que podremos comunicarnos en cualquier parte del mundo con dispositivos móviles flexibles y resistentes, o que existan robots que nos ayuden en nuestras tareas cotidianas. Sería fantástico que la tecnología llegara al punto que pudiéramos, por ejemplo, conocer nuestra condición médica mediante un simple escaneo corporal y poder corregir así cualquier tipo de anomalía. Pero, ¿cuánto tiempo estimas que tendremos que esperar para poder disfrutar de este tipo de tecnologías? Aunque no lo creas, es menor del que imaginas (figura 1).



Figura 1. Tecnologías del futuro (Science Focus, 2016).

Hasta hace algunos años, la ciencia y la tecnología se limitaban a lo que la humanidad captaba y conocía a través de sus sentidos, o con la ayuda de herramientas como el microscopio óptico. El conocimiento acerca de la naturaleza estaba limitado esencialmente a la escala macroscópica. En la década de los ochenta, con la invención de microscopios más sofisticados, como el microscopio de efecto túnel (1981) (Binnig y Rohrer, 1983), el ser humano pudo adentrarse a una escala desconocida: la nanométrica. Gerd Binnig y Heinrich Rohrer recibieron el Premio Nobel en Física en 1986 por “el diseño del microscopio de efecto túnel” (The Nobel Prize, 2020).

Para tener una idea de la escala nanométrica, puedes suponer que cortas longitudinalmente 100 mil veces el grosor de tu cabello, aunque probablemente sea algo difícil de imaginar, esta fracción corresponde aproximadamente a un nanómetro. Un nanómetro es la milmillonésima parte de un metro, o 1×10^{-9} metros, pero ¿qué tipo de objetos podemos encontrar con este tamaño? Ésta es la escala de objetos como la anchura de fibrillas de celulosa (20-100 nm), el diámetro de la doble hélice del ADN (2 nm), e inclusive la distancia entre átomos de un cristal de silicio (0.1 nm). La nanociencia es el estudio e investigación de nuevas propiedades y comportamiento de la materia que ocurren a escala nanométrica.

En 1998, Neal Lane, asesor en ciencia y tecnología de los Estados Unidos, expresó: “Si me preguntaran qué área de la ciencia e ingeniería es la que probablemente generará grandes avances del mañana, yo apuntaría hacia la ciencia e ingeniería a escala nanométrica” (National Science Foundation, 2000). La nanotecnología es el uso de las propiedades de la materia en la nanoescala para el desarrollo de dispositivos tecnológicos con nuevas aplicaciones, entre otros. Hoy, esta área es considerada como una de las más prometedoras para el desarrollo de tecnología de punta. Pero, ¿qué tiene de especial la materia a escala nanométrica?

El microscopio de efecto túnel o STM (*Scanning Tunneling Microscope*, por sus siglas en inglés) es un microscopio que basa su funcionamiento en el fenómeno cuántico denominado “efecto túnel”. Este efecto consiste en el paso de partículas a través de una barrera de potencial.

Una forma sencilla de visualizar el efecto túnel es imaginar que estás jugando fútbol en la playa tratando que una pelota sobrepase un montículo de arena. En el mundo macroscópico, el balón pasará al otro lado del montículo si su energía cinética (KE) es suficiente para vencer la barrera o energía potencial (U), es decir, la necesaria para subir y pasar el montículo (figura 2a). Si la energía cinética no es al menos ligeramente mayor a la energía potencial, la pelota no pasará al otro lado y probablemente regrese (figura 2b). Esto se debe a que tanto la energía cinética como potencial pueden ser intercambiables de acuerdo a la ley de la conservación de la energía, aunque la primera sea debida al movimiento y la segunda a la posición del objeto en el espacio.

Si redujéramos nuestras dimensiones y la pelota fuera del tamaño de una partícula atómica, ésta tendría la posibilidad de atravesar una barrera de energía potencial aun cuando su energía cinética no sea suficiente –pareciendo que es capaz de atravesar la barrera mediante un túnel, por increíble que parezca– (figura 2c). Esto se debe a que a esta escala la pelota adquiere características cuánticas de onda-partícula que no se pueden explicar adecuadamente por medio de la mecánica clásica. El primer gran cambio es que

LA MATERIA A ESCALA NANOMÉTRICA

A dimensiones muy pequeñas, la materia se comporta de una forma distinta debido a dos razones principales: el incremento de su área superficial y la aparición de nuevos fenómenos (IPN, 2019). Para comprender el efecto del área superficial es necesario imaginar que tienes un material en bulto. Al dividir el material en pedazos, el área superficial total del material será mayor, e irá incrementando si el material se divide en pedazos aún más pequeños (figura 3). En otras palabras, al disminuir el volumen de los elementos que conforman un material, su área superficial total aumenta. Dicha propiedad es conocida como relación área superficial-volumen.

¿Qué implica la disminución del tamaño? Cualquier material sólido que esté en bulto, está conformado por una gran cantidad de átomos que se encuentran interactuando, en una mayor proporción, con los átomos del mismo material que con átomos de la superficie. Lo anterior da al material estabilidad química y estructural, es decir, cuenta con mayor cohesión. Cuando el material se divide en pedazos pequeños, el área expuesta al entorno aumenta (figura 3) y, como consecuencia de esto, el material se vuelve mucho más reactivo debido a que su cohesión disminuye.

Como ya se mencionó, en la escala nanométrica se pueden presenciar efectos que en la macroescala son imperceptibles. Algunos de éstos son

efectos cuánticos que se explican por la mecánica cuántica, la cual establece reglas de comportamiento para sistemas de dimensiones pequeñas. Aquí la materia se comporta bajo la dualidad onda-partícula y es regida por el principio de incertidumbre. Los efectos cuánticos pueden modificar las propiedades ópticas, eléctricas y magnéticas de un material (IPN, 2019).

Además de la aparición de nuevos efectos, en la nanoescala se hace

presente el confinamiento del movimiento de los electrones al reducir el tamaño de los materiales a la escala nanométrica. Una forma sencilla de imaginar el confinamiento cuántico de electrones es pensar que estas partículas subatómicas son automóviles. Un automóvil no puede moverse en ninguna dirección cuando está dentro de una cochera, por lo que está confinado. Si el automóvil estuviera en una carretera de un solo carril, éste podría moverse a lo largo de la carretera, pero no podría moverse

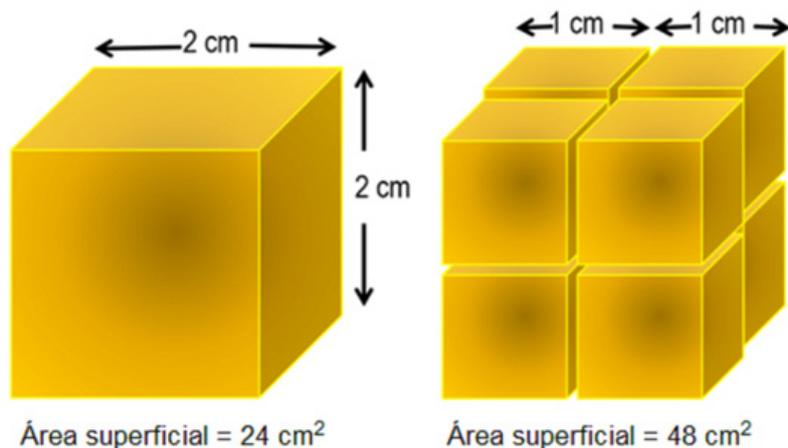


Figura 3. Incremento del área superficial como consecuencia de la disminución del tamaño (Peta International Science Consortium LTD, 2018).

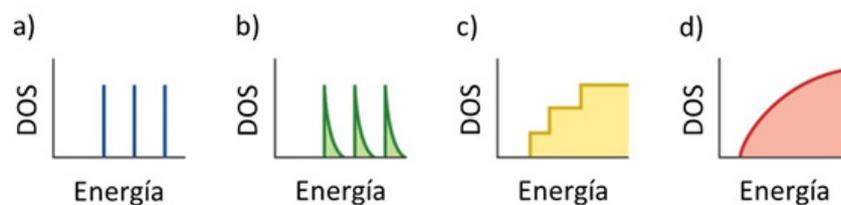
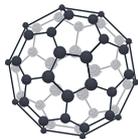
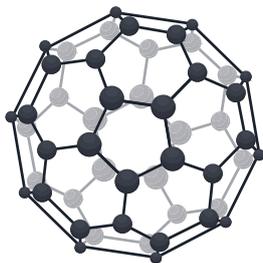
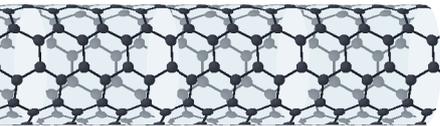


Figura 4. Estados de energía para nanoestructuras a) 0D, b) 1D, c) 2D y d) 3D (Rabouw y De Mello, 2016).



ni a la derecha ni a la izquierda. Si el automóvil estuviese en un estacionamiento de un nivel, podría moverse en dos dimensiones: lateral y frontal-reversa. Finalmente, si el automóvil estuviera en un estacionamiento de varios pisos podría moverse en tres direcciones independientes.

El confinamiento de los electrones tiene como consecuencia que la energía se comporta de formas distintas a las que lo haría en la macroescala. En aquellos casos en que el movimiento de los electrones es cero dimensional, la longitud de onda asociada al electrón es similar al tamaño del sistema en el cual está confinado. Debido a lo anterior, el número de estados existentes para cada nivel de energía del electrón toma valores discretos (figura 4a). En el caso de sistemas en los que el movimiento de los electrones es en una dirección, el número de estados dentro del intervalo de energía límite está restringido, por lo que no todos los valores son posibles (figura 4b). Por otra parte, en el caso en el que los electrones pueden moverse en dos dimensiones, la energía es continua, pero el número de estados posibles es discreto, debido a la cuantización (figura 4c). Finalmente, tanto la energía como el número de estados en materiales en bulto son continuos (figura 4d) (Mitin, Semestov y Vagidov, 2010).

mientras la mecánica clásica “predice” matemáticamente la posición y el momento lineal (ímpetu que tiene un cuerpo para realizar un trabajo) precisos de una partícula, la mecánica cuántica le asigna una “función de onda” a estos parámetros con una probabilidad entre cero y uno. Es decir, la posición y el momento de una partícula regida por la mecánica cuántica no se pueden conocer simultáneamente, hay una incertidumbre en su medición. Esto implica que si se le asigna una “función de onda” a la partícula dirigiéndose hacia una barrera (onda incidente) habrá una pequeña probabilidad de que “tunee” (onda transmitida) al otro lado, aun cuando la KE sea menor que la U (figura 2d). En el mundo macroscópico, es imposible que la pelota cruce esta barrera si su energía cinética no es mayor que su energía potencial. Sin embargo, en el mundo nano, la partícula tiene una probabilidad finita de “existir” en el lado opuesto al que incide debido a la dualidad onda-partícula y tal partícula “aparecerá” del otro lado de la barrera a pesar de no tener la energía necesaria para cruzarla. Como te habrás dado cuenta, el comportamiento de la materia en la escala nanométrica es diferente al que estamos acostumbrados en la macroescala (Max Planck Society, 2007).

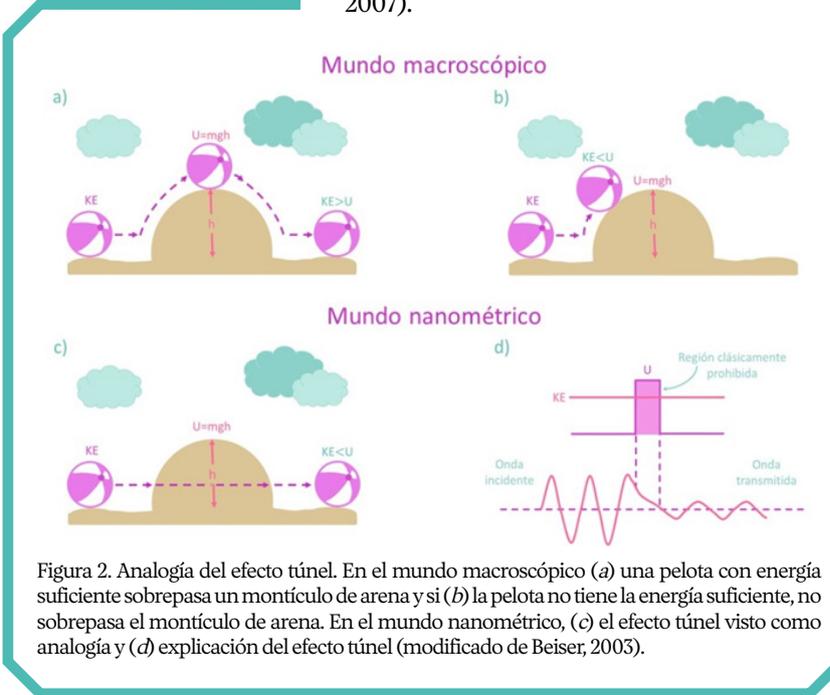


Figura 2. Analogía del efecto túnel. En el mundo macroscópico (a) una pelota con energía suficiente sobrepasa un montículo de arena y si (b) la pelota no tiene la energía suficiente, no sobrepasa el montículo de arena. En el mundo nanométrico, (c) el efecto túnel visto como analogía y (d) explicación del efecto túnel (modificado de Beiser, 2003).

NANOESTRUCTURAS Y NANOMATERIALES

Una de las principales características de la materia en la nanoescala es que se encuentra conformada por estructuras que tienen al menos una dimensión en la escala nanométrica (generalmente menos de 100 nm), a éstas se les denomina nanoestructuras. Las nanoestructuras pueden clasificarse de acuerdo al número de dimensiones que no están confinadas a la nanoescala. Entre las nanoestructuras cero dimensionales (figura 5a) se pueden encontrar las nanopartículas y los puntos cuánticos (figura 5e). También se pueden encontrar nanoestructuras unidimensionales (figura 5b) como las nanovarillas, los nanohilos y los nano-

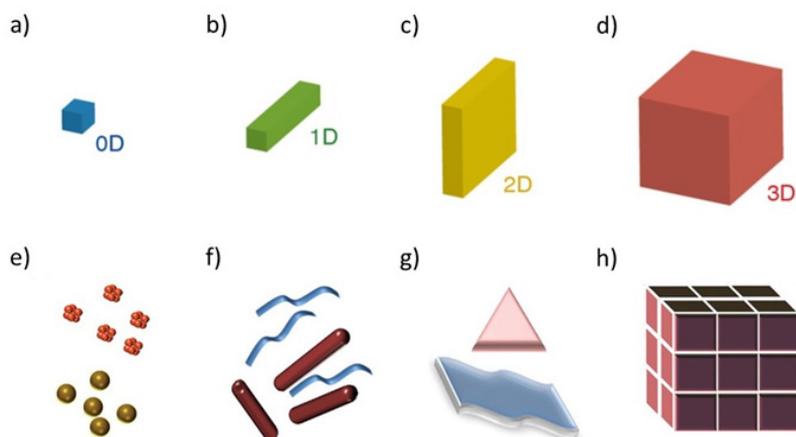


Figura 5. Nanoestructuras a) cero, b) uno, c) bi y d) tri dimensionales; e) nanopartículas, f) nanohilos, g) películas delgadas y h) material en bulto (Rabouw y De Mello, 2016; Sajanlal *et al.*, 2011).

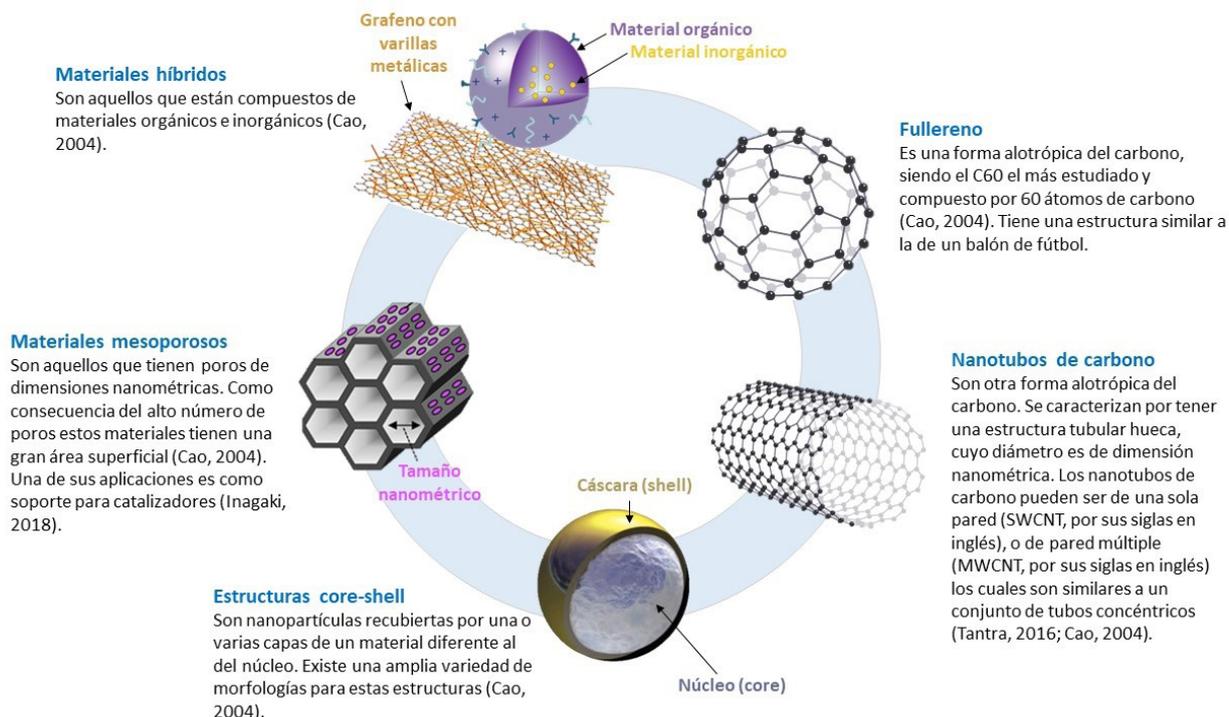


Figura 6. Nanomateriales (Bitesize, 2020; Atwater, 2007; Inagaki, 2018; Ling *et al.*, 2014; Empa, 2019; Tantra, 2016; Cao, 2004).

tubos de carbono (figura 5f). Entre las nanoestructuras bidimensionales (figura 5c) se hallan las películas delgadas (figura 5g) con grosores en el orden de unos cuantos nanómetros, las cuales por lo regular son depositados en materiales en bulto. Las propiedades de estas estructuras se encuentran dominadas por sus características de superficie y efectos de interfaz (Tantra, 2016).

Por último, pueden hallarse nanoestructuras tridimensionales, las cuales se caracterizan porque los átomos se encuentran en tres dimensiones del material (figura 5d) teniendo ciertas propiedades físicas semejantes a las del bulto, como las nanoestructuras porosas. Cada tipo de nanoestructura se comporta de manera distinta pues, además del tipo de material y el método de síntesis, el tamaño y la morfología determinan una gran variedad de propiedades físicas y químicas del material. Al conjunto de nanoestructuras en un material, o a los materiales que poseen una estructura interna o de superficie con características nanométricas se les conoce como materiales nanoestructurados o nanomateriales (figura 5h). Entre los nanomateriales más populares se encuentran los fullerenos, los nanotubos de carbono, los materiales mesoporosos, las estructuras tipo “core-shell” y los materiales híbridos (figura 6) (Tantra, 2016).

La nanotecnología es un campo multidisciplinario, es decir, es un área de investigación en la que se involucran diferentes campos de la ciencia. Requiere del trabajo conjunto de químicos, biólogos, físicos e ingenieros para poder llevar a cabo el desarrollo de nuevas tecnologías y búsqueda de aplicaciones.

REFERENCIAS

- Atwater, H.A. (2007). The Promise of Plasmonics. *Scientific American Reports*. 17:56-63. DOI: 10.1038/scientificamerican0907-56sp
- Beiser, A. (2003). *Concepts of Modern Physics*. Estados Unidos de América: McGraw-Hill.
- Binnig, G., y Rohrer, H. (1983). Scanning Tunneling Microscopy. *Surface Science*. 126:236-244.
- Bitesize. (2020). *Why are nanoparticles so useful?* BBC. Disponible en: <https://www.bbc.co.uk/bitesize/guides/zpvfk2p/revision/3>
- Cao, G. (2004). *Nanostructures and Nanomaterials: Synthesis, properties and Applications*. Inglaterra: Imperial College Press.
- Empa: Material Science and Technology. (2019). *Particles-Biology interactions Lab*. Disponible en: <https://www.empa.ch/web/s403>
- Inagaki, S. (2018). Synthesis and Optical Applications of Periodic Mesoporous Organosilicas. *The Enzymes*. 44:11-34. DOI: 10.1016/bs.enz.2018.09.004
- Instituto Politécnico Nacional. (2019). *Fenómenos y procesos fundamentales en nanociencia*. Red de Nanociencia y Micronanotecnología. Disponible en: <https://www.ipn.mx/coriyp/redes/red-de-nanociencia-y-micronanotecnologia/lineas-de-investigacion-de-nano.html>
- Ling, S., Li, C., Adamcik, J., et al. (2014). Directed Growth of Silk Nanofibrils on Graphene and Their Hybrid Nanocomposites. *ACS Macro Letters*. 3:146-152. DOI: 10.1021/mz400639y
- Max Planck Society. (2007). Electrons Caught In The Act Of Tunneling. *ScienceDaily*. Disponible en: www.sciencedaily.com/releases/2007/04/070412131304.htm
- Mitin, V., Semestov, D., y Vagidov, N. (2010). *Quantum Mechanics for Nanostructures*. Nueva York: Cambridge University Press.
- National Science Foundation. (2000). *Testimony Dr. Neal Lane*. Disponible en: <https://www.nsf.gov/about/congress/105/nlane498.jsp>
- Peta International Science Consortium LTD. (2018). *Nanotechnology and Nonanimal Testing Methods*. Disponible en: <https://www.piscltd.org.uk/nano/>
- Rabouw, F.T., y De Mello, D.C. (2016). Excited-State Dynamics in Colloidal Semiconductor Nanocrystals. *Topics in Current Chemistry*. 374:58. DOI 10.1007/s41061-016-0060-0
- Sajanlal, P., Sreepasad, T., Samal, A., et al. (2011). Anisotropic nanomaterials: structure, growth, assembly, and functions. *Nano Reviews*. 2:5883. DOI: 10.3402/nanov2i0.5883
- Science Focus. (2016). *Future technology: 22 ideas about to change our world*. BBC Science Focus Magazine. Disponible en: <https://www.sciencefocus.com/future-technology/future-technology-22-ideas-about-to-change-our-world/>
- Tantra, R. (editor). (2016). *Nanomaterial Characterization: An Introduction*. Nueva Jersey: John Wiley & Sons.
- The Nobel Prize. (2020). *All Nobel Prizes in Physics*. NobelPrize.org. Disponible en: <https://www.nobelprize.org/prizes/lists/all-nobel-prizes-in-physics/>