

DEL PUNTO ABSTRACTO AL UNIVERSO CUÁNTICO: NANOTECNOLOGÍA QUE ATRAPA ELECTRONES



Víctor Hugo Méndez García
victor.mendez@uaslp.mx

Leticia Ithsmel Espinosa
Irving Eduardo Cortes
CIACYT/Facultad de Ciencias

RESUMEN

Desde un simple trazo de lápiz en el papel hasta los nanocrisales que hoy iluminan nuestras pantallas de televisión, el punto es mucho más que una pequeña marca: es un puente entre lo abstracto y lo real. Lo que en matemáticas parece no tener dimensiones, en la física moderna se transforma en un universo entero de posibilidades. Los puntos cuánticos, esos diminutos cristales capaces de confinar electrones, han abierto una frontera donde lo invisible se vuelve útil y lo minúsculo se vuelve poderoso. Concluimos que lo diminuto no es despreciable, sino todo lo contrario: en los puntos cuánticos convergen ciencia básica y tecnología con potencial para desarrollar la comunicación y la computación cuántica; y lo que sigue en estas páginas es un recorrido para descubrir cómo todo surge de lo más pequeño y cómo, al controlarlo, emergen fenómenos reales que parecen ficción y que permitirán transformar el mundo que nos rodea.

PALABRAS CLAVE: punto matemático; dimensiones (0D-3D); dualidad ondapartícula; principio de incertidumbre; confinamiento cuántico; puntos cuánticos; comunicación cuántica.

ENTRE LO ABSTRACTO Y LO REAL

En matemáticas, el punto es el principio y el fin de toda construcción geométrica: un ente abstracto, sin tamaño ni forma, que existe únicamente para señalar una posición. Su naturaleza radica en no tener existencia física; es meramente un concepto. Sin embargo, al intentar plasmarlo en una hoja, nos enfrentamos a la imperfección propia del mundo real (Figura 1).



Con un lápiz afilado o un bolígrafo, nuestro punto se convierte en una minúscula mancha de grafito o tinta: tiene grosor, textura y color. Su diámetro, aunque diminuto, puede medir del orden de décimas de milímetro, lo que lo convierte en un gigante en comparación con el punto ideal definido en nuestras clases de matemáticas, que carece de dimensiones (no tiene ancho, ni largo ni alto).

Además, nuestro ojo impone un límite. Si lográramos afinar la punta del lápiz y

trazar un punto aún más diminuto, llegaría a un límite en el cual dejaríamos de percibirlo: el punto comienza a desvanecerse. La visión humana es finita.

Así, entre su concepto ideal y su representación física se abre un espacio fascinante: el de lo abstracto y su realización en el mundo real. En este pequeño acto de trazar un punto, de la mente al papel, se establece la relación entre la matemática y la realidad: un diálogo entre las ideas y su materialización.

EL PUNTO: GENERADOR DE DIMENSIONES

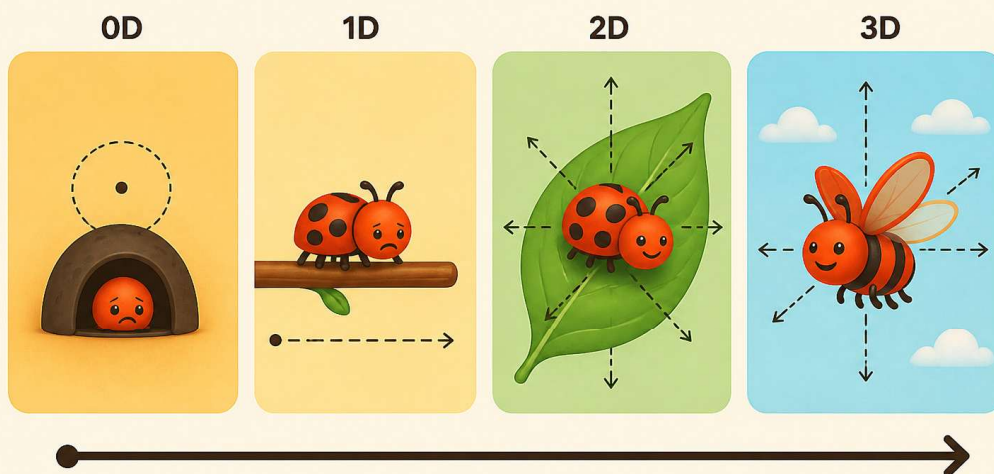
La palabra “dimensión” tiene raíces que trascienden el ámbito científico. En un sentido filosófico o metafísico, se ha utilizado para describir planos o esferas de existencia más allá de lo que percibimos como real, lo que podemos ver o tocar. Así, se habla de dimensiones de la mente, como aquellos espacios donde habitan las ideas, los sueños y la imaginación; o de dimensiones espirituales, concebidas como realidades no físicas o distintos estados de conciencia. En este contexto, la dimensión no es una magnitud medible, sino un marco de existencia, un nivel de realidad que amplía nuestra percepción de lo que entendemos por “estar” o “ser”.

En el terreno del pensamiento matemático y físico, el concepto está más relacionado con la “posición” y el “desplazamiento”. En nuestro mundo, el espacio se describe mediante tres dimensiones, denotadas como 3D, las cuales pueden construirse a partir del elemento más básico que hemos discutido: el punto.

A partir de un punto podemos construir líneas, planos y volúmenes (Figura 2). Una línea aparece al extender un punto en una dirección, como cuando arrastramos el lápiz en línea recta; así se genera la primera dimensión (1D). Una mini

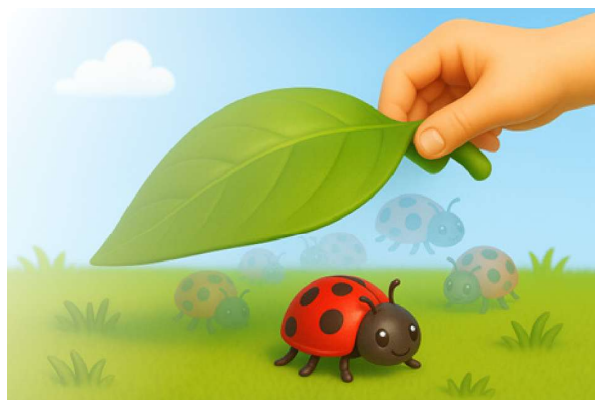
catarina colocada ahí, puede desplazarse hacia adelante o hacia atrás, confinada a una línea. Ahora bien, extendamos toda esta línea sobre la hoja, como al frotar una tiza acostada; entonces surge lo que conocemos como segunda dimensión (2D). La catarina puede caminar sobre un plano en múltiples trayectorias, ya no solo en un eje sino en toda la superficie. Finalmente, el espacio tridimensional (3D) se obtiene al extender el plano en una tercera dirección. Levantemos la hoja, abriendo más espacio en la dirección perpendicular, aparece el volumen. Ya puede volar nuestra catarina.

Figura 2. Generación de dimensiones a partir de un punto: en 0D la catarina permanece confinada en un punto; en 1D se desplaza únicamente sobre una línea (rama); en 2D puede moverse libremente sobre un plano (hoja); y en 3D adquiere libertad total de movimiento en el espacio (volando en todas direcciones).



UNA CATARINA EN EL MUNDO CUÁNTICO

La libertad de moverse es opuesta al grado de confinamiento. Ahora bien: confinar es limitar, y como toda restricción, esto puede causar ansiedad y desatino! Pero a escalas diminutas, en el mundo cuántico, la posibilidad de confinar ha revolucionado áreas como la electrónica, las comunicaciones, la industria aeroespacial, y muchísimas más.



Y es que, a escalas muy pequeñas —más específicamente a nanoescala—, las reglas de la física cotidiana dejan de describir íntegramente el comportamiento de los sistemas. Si redujéramos nuestra catarina hasta el tamaño de un electrón, su comportamiento dejaría de ser el de un animalito con posición bien definida y comenzaría a comportarse de una manera muy distinta: podría manifestar propiedades ondulatorias, como la luz!. Es decir, podría “extenderse” en el espacio, reflejarse o incluso atravesar barreras en un fenómeno conocido como efecto túnel. Y lo más sorprendente es que también ocurre al revés: algo que pensamos como una onda puede comportarse como una partícula. A esto se le conoce como dualidad onda-partícula, uno de los aspectos más fascinantes de la física moderna.

Pero no solo eso, en la música, una nota o tono se logra solo si la cuerda vibra de cierta forma (es decir, al estar afinada) y de manera análoga la catarina podría adoptar únicamente ciertos valores de energía (un modo de vibración determina una energía específica). Su estado deja entonces de ser

continuo y se vuelve discreto: cantidades a “saltos”. De allí proviene el nombre de física cuántica: la física de lo cuantizado. [1]

Para visualizarlo, imaginemos un mundo en el que esta ley cuántica gobernara también nuestro entorno cotidiano, es decir, el mundo macroscópico. La catarina cuántica no podría volar alcanzando cualquier altura de manera continua, sino únicamente ciertas alturas “permitidas”. Supongamos que son 1, 2 y 3 metros. Si está a 1m, permanecería allí y probablemente mediante un impulso puede pasar a 2m, pero nunca tomar posiciones intermedias. Asimismo, de 2 a 3 metros: o está en 2 o en 3m, pero nunca en una altura intermedia. Es extraño y, al mismo tiempo, difícil de comprender, pero este modo de existir en niveles discretos a nanoescala forma parte de un conjunto de fenómenos que hoy se aprovechan en la creación de dispositivos cotidianos de alto desempeño, de los cuales hablaremos más adelante.

La catarina cuántica también presenta otra característica sorprendente: nunca podemos conocer todo de ella al mismo

tiempo. Si intento fijarme en dónde está, puedo obtener una idea relativamente precisa de su posición, pero al mismo tiempo pierdo información sobre cómo se mueve, es decir, sobre su velocidad. Además, al intentar observarla, puedo alterarla: en el proceso de localizarla, quizá ya se movió, o incluso mi propia intervención la desplazó. En cambio, si me concentro en medir su velocidad, entonces ya no puedo saber con certeza dónde se encontraba.

Es como jugar a las escondidas con un bichito escurridizo: en el mismo intento de observarla, ya la he alterado. Lo único que puedo afirmar es la probabilidad de encontrarla en cierto lugar: tal vez esté aquí, o quizá allá... pero nunca con certeza absoluta. Lo que aparece aquí son dos de los grandes pilares de la física cuántica: el principio de incertidumbre, que impide conocer simultáneamente ciertas magnitudes con precisión absoluta, y la naturaleza probabilística de los procesos [2], que solo nos permite hablar de la probabilidad de encontrarla en cierto lugar (Figura 3).

Figura 3. Incertidumbre y probabilidad en nuestra “catarina cuántica”.

Arriba: representación de una posición bien definida antes de realizar una medición.

Abajo: representación de la naturaleza probabilística del estado cuántico, en el que no es posible asignar una posición determinada antes de la medición, sino únicamente una probabilidad de encontrar la catarina en una posición particular.



Y lo más sorprendente es que todos estos fenómenos —la cuantización, la dualidad onda-partícula y la naturaleza probabilística— no pertenecen únicamente al terreno de la teoría: hoy sabemos cómo provocarlos y controlarlos al confinar la materia a escalas nanométricas. Es precisamente en este confinamiento donde todas estas ideas se condensan en una pieza clave de la nanotecnología que ya impacta nuestra vida cotidiana: el punto cuántico.

CERO DIMENSIONES, POTENCIAL INFINITO

Un punto cuántico es un cristalito tan diminuto que logra atrapar electrones en todas direcciones. En ese encierro, ya no pueden moverse libremente: es un sistema de cero dimensiones (0D), como la catarina en la cuevita. Como parte de su naturaleza cuántica, los electrones se comportan como onda y partícula a la vez, no pueden localizarse con certeza y su energía toma valores discretos, es decir, está cuantizada. Por estas propiedades se les conoce como “átomos artificiales”.

Pero ¿por qué todo esto representa una ventaja? La discretización de la energía hace que su interacción con estímulos exteriores —por ejemplo, con la luz— sea mucho más selectiva: en lugar de responder

de forma difusa, lo hace en valores bien definidos. Al existir menos estados disponibles, se reducen las pérdidas y aumenta la probabilidad de que ocurran procesos útiles, como la emisión o absorción de luz. En conjunto, este control permite diseñar materiales más eficientes y con propiedades ajustables, lo que abre la puerta a nuevas tecnologías.

En otras palabras, cuando la energía está cuantizada, las transiciones ocurren entre niveles bien definidos, lo que favorece una interacción selectiva y eficiente con la radiación. En contraste, en sistemas con energía continua, la respuesta es difusa, lo que conduce a una interacción menos eficiente (Figura 4).

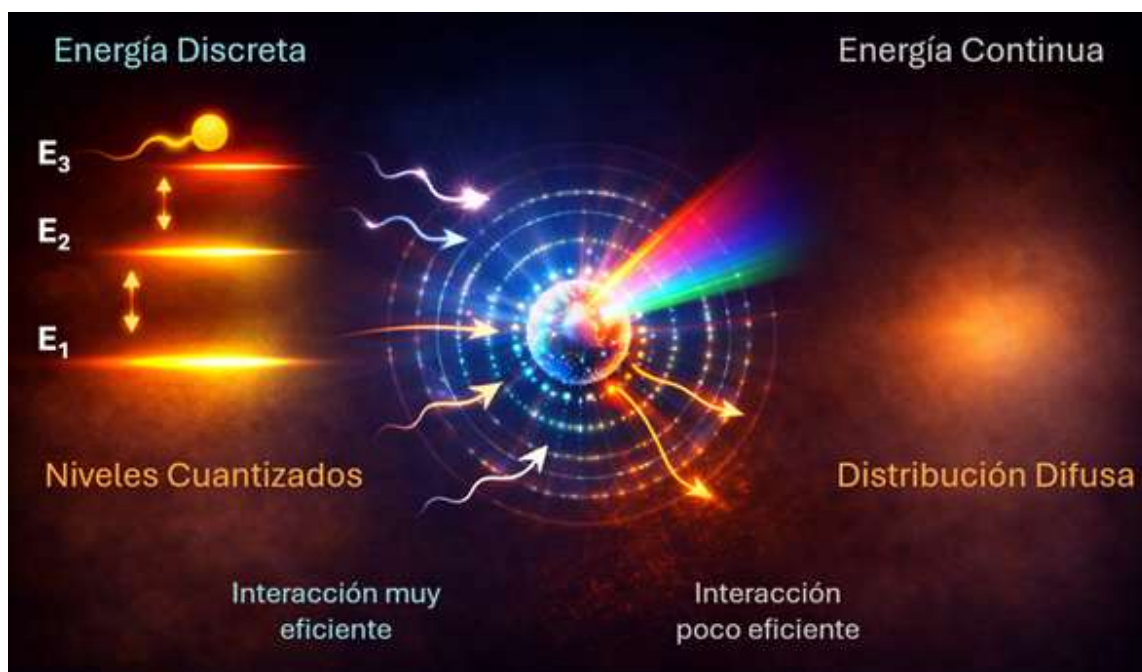


Figura 4. Esquema conceptual de la interacción en sistemas cuánticos. Cuando la energía está cuantizada (izquierda), los electrones solo pueden ocupar niveles bien definidos, lo que permite interacciones selectivas con la luz. En cambio, en sistemas con energía continua (derecha), la respuesta es difusa y menos selectiva. Esta diferencia es la base del alto desempeño de dispositivos basados en puntos cuánticos.

Lejos de ser solo un concepto de laboratorio, los puntos cuánticos ya forman parte de nuestra vida cotidiana en diversas tecnologías emergentes (Figura 5). Precisamente gracias a esa interacción selectiva con la luz, en las pantallas de televisores y teléfonos móviles permiten obtener colores más vivos, brillantes y bien definidos. De manera similar, en el campo de la energía solar, esta selectividad promete paneles más eficientes, capaces de aprovechar mejor la radiación del sol. En medicina, su capacidad de emitir luz de forma precisa los convierte en marcadores ideales, permitiendo localizar tumores en etapas tempranas con gran sensibilidad.



Figura 5. Aplicaciones de los puntos cuánticos en tecnologías de frontera. Los puntos cuánticos ya forman parte de nuestra vida cotidiana, presentes en pantallas de televisión y dispositivos móviles, en paneles fotovoltaicos y en áreas como la nanomedicina. En el futuro cercano, serán la base de nuevas formas de comunicación y computación cuántica.

Pero quizá lo más sorprendente es que estas mismas ideas están dando origen a nuevas áreas de la nanotecnología que ya comienzan a tomar forma: la comunicación y la computación cuántica. Al controlar con precisión los estados cuánticos — como ocurre en los puntos cuánticos— es posible manipular la información de ma-

neras completamente nuevas, permitiendo transmitirla con mayor seguridad y procesarla de forma mucho más eficiente. En particular, la computación cuántica promete cambiar profundamente la manera en que resolvemos problemas, abriendo posibilidades que hoy están fuera del alcance de las computadoras tradicionales.

NANOTECNOLOGÍA EN MÉXICO

Diversos grupos de investigación en nanotecnología trabajan en el desarrollo y estudio de nanoestructuras capaces de confinar electrones en distintas dimensiones (2D, 1D y 0D) en nuestro país. Estas estructuras se fabrican mediante técnicas de alta precisión, como la epitaxia de haces moleculares (MBE, por sus siglas en inglés), que permite depositar átomos capa por capa y construir materiales con control casi atómico. [3]

En el contexto de la nanotecnología, no solo se busca crear puntos cuánticos, sino entender y optimizar las condiciones bajo las cuales se forman. Para ello, se emplean herramientas que permiten observar su crecimiento prácticamente en tiempo real, revelando cómo emergen estas estructuras diminutas y qué formas adoptan: pirámides, lentes o configuraciones más complejas (Figura 6).

Si regresamos al punto de partida de este ensayo, aquel ente abstracto sin dimensiones, encontramos un contraste fascinante: en el laboratorio, ese “punto” adquiere forma, tamaño y propiedades medibles. Y, aunque se trate de estructuras extraordinariamente pequeñas, su geometría puede determinarse con gran precisión, evidenciando cómo lo más diminuto puede ser también profundamente estructurado.

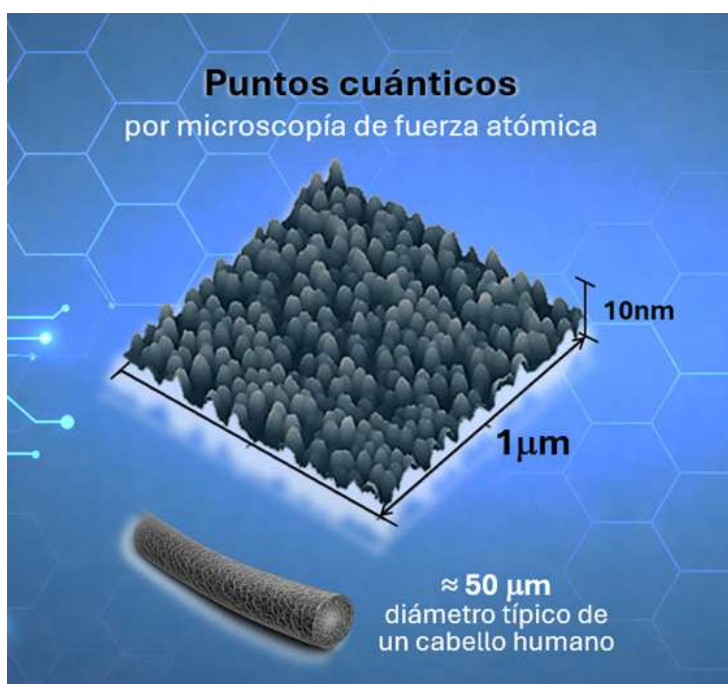


Figura 6. Imagen de microscopía de fuerza atómica (AFM) de puntos cuánticos autoensamblados. Estas nanoestructuras presentan tamaños del orden de decenas de nanómetros, muy por debajo del diámetro típico de un cabello humano (~50 μm). Si consideramos puntos cuánticos de aproximadamente 10 nm de diámetro, a lo largo del grosor de un cabello cabrían cerca de 5,000 de ellos uno junto a otro. Dentro de cada uno de estos diminutos conitos podríamos imaginar a la catarina atrapada. Esta comparación permite dimensionar la diminuta escala en la que opera la nanotecnología.

Estos avances forman parte de un esfuerzo más amplio dentro de la comunidad científica dedicada al estudio de materiales y nanoestructuras. En particular, temas como los aquí abordados son impulsados y difundidos por la Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Materiales y Superficies (SMCTSM), que agrupa a investigadores y promueve el desarrollo de esta área en el país.

Y es aquí donde las nuevas generaciones tienen un papel fundamental. La nanotecnología, y en particular el estudio de sistemas como los puntos cuánticos, es un campo en plena expansión que demanda nuevas ideas, curiosidad y creatividad. Lo que hoy puede parecer complejo, lejano o incluso propio de la ciencia ficción, mañana puede convertirse en una herramienta cotidiana. En ese camino, no solo se trata de entender lo más pequeño, sino de aprender a controlarlo. Tal vez seas tú quien contribuya a dar ese siguiente paso, llevando ese “punto” —que comenzó como una idea abstracta— hacia nuevas formas de tecnología que aún están por descubrirse.

REFERENCIAS:

- (1) National Geographic en Español. 2023, ¿Qué es la teoría cuántica? National Geographic Latinoamérica. <https://www.nationalgeographicla.com/ciencia/2023/02/que-es-la-teoria-cuantica>
- (2) Cultura Científica. 2020, El principio de incertidumbre cuantitativamente. . Experientia Docet. <https://culturacientifica.com/2020/01/21/el-principio-de-incertidumbre-cuantitativamente>
- (3) Mendez-Garcia V.H., Espinosa-Vega L.I., Cortes-Mestizo I.E. 2023, Crecimiento cristalino: un proceso fascinante. Universitarios Potosinos, volumen 22 No. 275, paginas 1-7.

