



**Revolucionando la
informática: liberando el
poder de teoría cuántica a
través de la
Termodinámica**

Luis E. Rocha Soto
Cesar E. Damián Ascencio
Sergio Cano Andrade
Adriana Saldaña Robles



Revolucionando la informática: liberando el poder de teoría cuántica a través de la Termodinámica

Cómo citar este artículo: Rocha-Soto LE, Damian-Ascencio CE, Cano-Andrade S, Saldaña-Robles A. 2025. Revolucionando la informática: liberando el poder de teoría cuántica a través de la Termodinámica. Revista Ciencia y Naturaleza (1137).



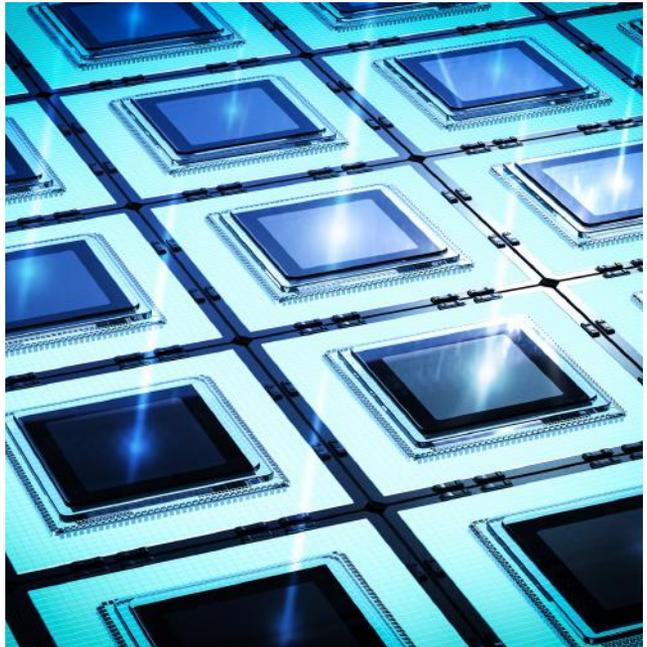


Bits cuánticos: El futuro de la computación

En el año de 1981 el reconocido físico Richard Feynman, ganador del Premio Nobel de Física en 1965, brindó una conferencia en el Instituto Tecnológico de Massachusetts, en la que concluyó motivando a la audiencia a desarrollar una nueva generación de computadoras basadas en la física de lo muy pequeño; es decir, en la física cuántica. Este discurso es lo que daría pie al desarrollo de la computación cuántica, pero **¿por qué desarrollar la computación a escalas tan pequeñas? ¿No pueden los ordenadores actuales realizar lo mismo que podría hacer un procesador cuántico?**



Para responder estas preguntas hay que recordar cómo funciona la computación actual (llamada computación clásica). Para procesar y transmitir la información, un ordenador clásico usa el lenguaje binario, es decir, usa 0 y 1 como unidades mínimas de información, conocidos como bits. Estos números pueden representar, por ejemplo, si pasa una corriente eléctrica, 1, o si no pasa, 0, a través de un circuito. Con el uso de este lenguaje se han desarrollado operaciones lógicas que a su vez forman los complejos algoritmos con los que trabaja una computadora. Es importante destacar que con este lenguaje solo se tienen dos opciones, o se tiene un 1, o se tiene un 0, como respuesta a una operación lógica.



Por otro lado, la unidad mínima de información en la computación cuántica es el bit cuántico o qubit (quantum bit) el cual, al igual que el bit clásico, tiene 2 posibles estados que son 0 y 1. Sin embargo, el qubit presenta la ventaja de generar como respuesta las dos opciones, 0 y 1, al mismo tiempo gracias al principio de superposición. Además, puede transmitir información de manera instantánea mediante el entrelazamiento cuántico. Debido a estas características, la computación cuántica promete transformar el procesamiento de la información aprovechando los principios de superposición y entrelazamiento de la mecánica cuántica. Conforme esta tecnología avanza, la Termodinámica se convierte en una herramienta clave para comprender, optimizar y mejorar la eficiencia de las computadoras cuánticas.

Estudiar la computación cuántica aplicando Termodinámica requiere entender cómo la energía y otras propiedades se transfieren entre los sistemas cuánticos y su entorno. Esta interacción con el ambiente es la responsable de que se pierda el entrelazamiento en los sistemas cuánticos, lo que se llama decoherencia.

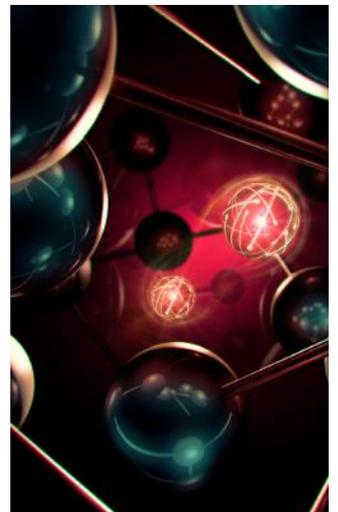
“La computación cuántica promete transformar el procesamiento de la información, aprovechando los principios de superposición y entrelazamiento de la mecánica cuántica.”



Fundamentos de la información cuántica

En la computación cuántica, la unidad básica de información es el qubit, que aprovecha algunas propiedades cuánticas interesantes conocidas como la superposición y el entrelazamiento.

La superposición cuántica establece que un qubit puede estar en el estado 0, en el estado 1, o en una combinación de ambos. Esto permite que se puedan realizar cálculos de forma simultánea, no uno después de otro y, por consiguiente, que las computadoras cuánticas tengan un procesamiento significativamente mayor. Este fenómeno es usualmente visualizado en lo que se conoce como esfera de *Bloch*, ver Figura 1, que representa ambos estados mediante la notación $|0\rangle$ y $|1\rangle$ indicados por flechas apuntando hacia la parte superior e inferior de la esfera, respectivamente.





Esto quiere decir que se pueden realizar cálculos utilizando el $|0\rangle$, el $|1\rangle$, o una combinación de ambos, $|0\rangle + |1\rangle$, en una operación lógica, acelerando el procesamiento de la información. Lo anterior representa una ventaja de la computación cuántica sobre la computación clásica. Además, abre las puertas a nuevas formas de diseñar algoritmos que sean capaces de realizar en algunos segundos lo que a una computadora clásica le tomará días, meses, o incluso años.

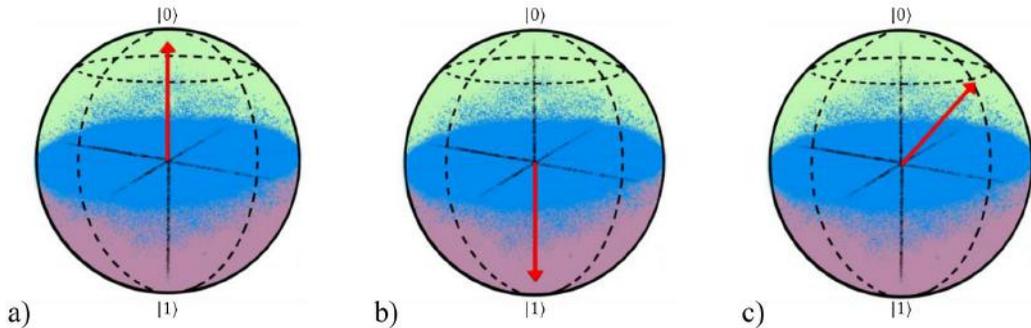
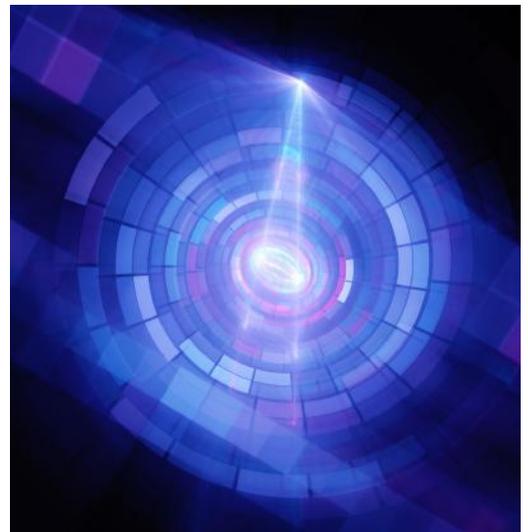


Figura 1. Representación de un qubit en la esfera de Bloch. Nota: Para a) el estado es $|0\rangle$, para b) el estado es $|1\rangle$, y para c) el estado es una superposición de los estados $|0\rangle$ y $|1\rangle$.

Para entender esto se propone un ejemplo. Imaginemos que tenemos una pelota dentro de una caja, pero no es una pelota común sino una pelota cuántica, por lo que su color va a ser de color lila y azul al mismo tiempo, ver Figura 2. De acuerdo con los postulados de la mecánica cuántica no podemos saber el color de la pelota hasta que se abra la caja, por lo que en todo momento se va a encontrar en estado de superposición.





Ahora imaginemos que esta pelota se la enviamos a Alicia, que se encuentra en la Ciudad de México, y ponemos otra pelota similar en otra caja, y se la enviamos a Beto, que se encuentra en París, ver Figura 3. Mientras las pelotas permanezcan en sus respectivas cajas, estarán en una superposición de colores. El color de la pelota sólo se determinará en el momento que Alicia o Beto abran la caja y vean la pelota que tiene cada uno; además, no hay forma de saber el color de la pelota sin abrir la caja. Alicia y Beto podrían jugar con estas pelotas abriendo y cerrando la caja, y viendo cómo de forma aleatoria cambia el color de la pelota que cada uno tiene. A esto se le conoce como colapso de la función de onda, lo que ocasiona que termine la superposición cuántica.

Figura 2. Pelota cuántica representando la superposición de dos colores, azul y lila. Nota: Si la pelota es cuántica, los colores azul y lila coexisten al mismo tiempo, en un estado conocido como estado de superposición.

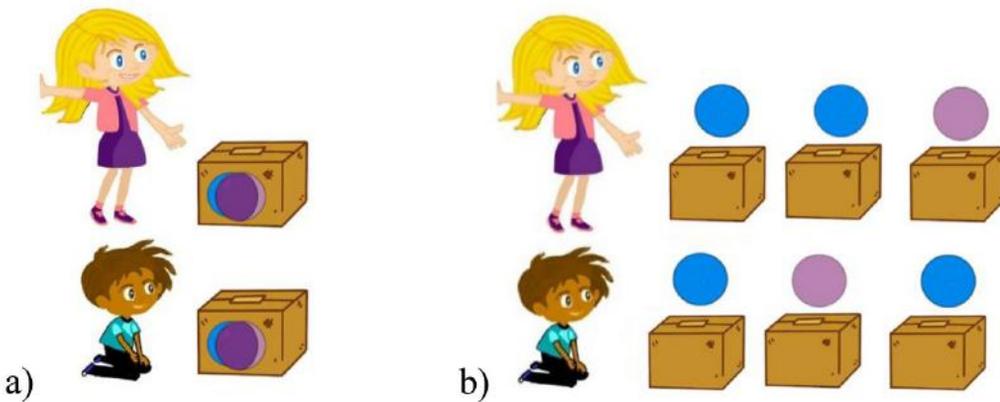
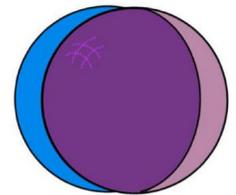
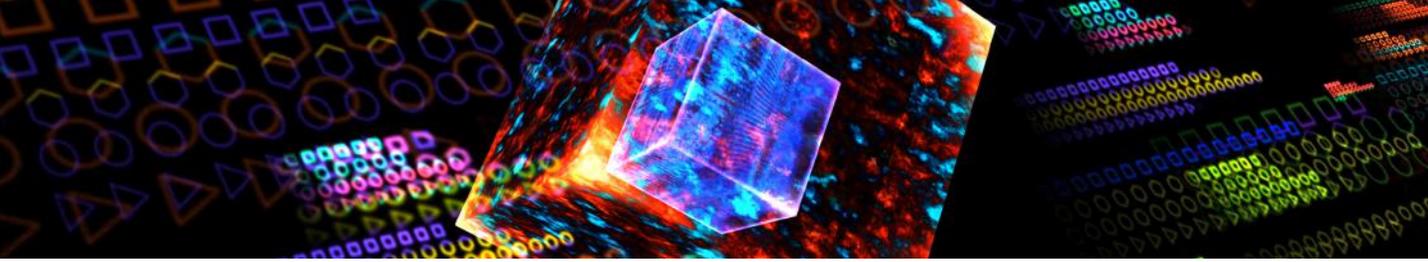


Figura 3. Colapso de la función de onda o terminación de la superposición cuántica. Nota: a) Alicia y Beto tienen cada uno una caja que tiene una pelota cuántica, donde antes de abrirlas los colores coexisten en un estado de superposición; b) sin embargo, al abrir la caja Alicia o Beto solo pueden ver un color en específico.





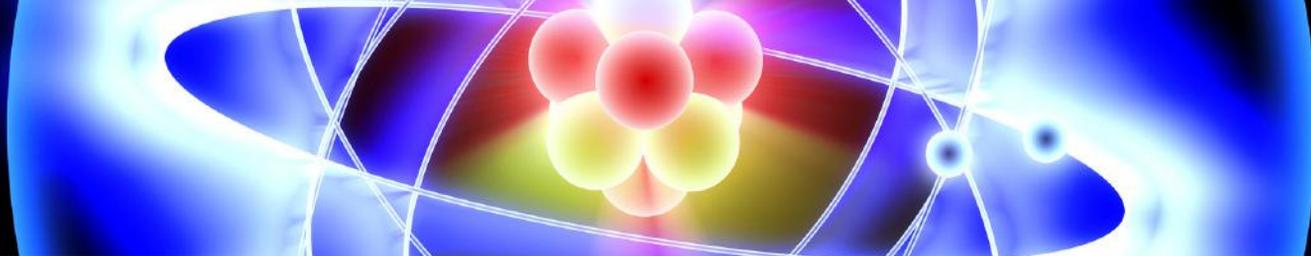
Entrelazamiento cuántico

El entrelazamiento cuántico es un fenómeno que no tiene ninguna similitud con lo conocido en el mundo clásico. Se puede entender como una conexión a larga distancia entre partículas, obligando a abandonar los conceptos clásicos de localidad y realidad. Esto fue demostrado en 1964 por John Bell, quien formuló unas desigualdades que los sistemas clásicos deberían cumplir. Sin embargo, los experimentos llevados a cabo en los años 70s y 80s por Alain Aspect, John F. Clauser y Anton Zeilinger mostraron que, en los sistemas cuánticos entrelazados, estas desigualdades no se cumplen.

El hecho que las desigualdades de Bell no se cumplan en estos experimentos lleva a la conclusión de que el principio de localidad no se aplica en el mundo cuántico. Este principio, fundamental en la física clásica, establece que cualquier efecto debe tener una causa dentro del mismo espacio en el que ocurre.

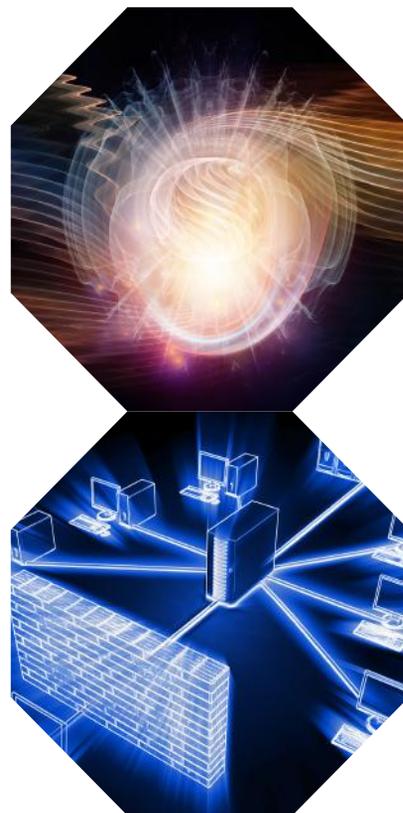
Por ejemplo, encender el aire acondicionado enfría la habitación donde éste se encuentra, pero no tendría sentido pensar que, al encenderlo en una casa ubicada en un cierto país, la que se enfría es otra casa ubicada en otro país. Es decir, una causa provoca un efecto dentro de un mismo espacio y tiempo establecido.





“Los experimentos realizados por Aspect, Clauser y Zeilinger demostraron que la medición de una propiedad de una partícula cuántica, como un fotón, afecta de manera instantánea a la misma propiedad de otra partícula que se encuentra muy alejada y entrelazada con el fotón”.

Ahora imaginemos que ambas pelotas se entrelazan cuánticamente antes de ser enviadas a Alicia y Beto (ver Figura 4). Cuando Alicia recibe su caja y la abre, descubre que es de color lila. ¿Por qué es relevante ese dato? Porque ahora podemos saber con total certeza que la pelota de Beto va a ser de color azul, incluso antes de que Beto la abra; es decir, al observar una de las pelotas se afecta el estado de la otra aun sin haber sido observada debido al entrelazamiento cuántico. Podemos repetir el experimento enviando distintas pelotas a Alicia y a Beto, y en todos los casos vamos a descubrir que, en el momento en el que Alicia observa el color de su pelota, la pelota de Beto va a tomar inmediatamente el otro color antes de que Beto la observe.



Este fenómeno ocurre sin importar la distancia que separa a Alicia de Beto. Incluso si estuvieran en planetas distintos, las partículas entrelazadas podrían modificar sus propiedades mutuamente de forma instantánea, como si existiera un medio capaz de intercambiar información a largas distancias de manera inmediata. Esta capacidad de transmitir información entre partículas entrelazadas es de gran interés en la computación cuántica, ya que puede utilizarse para procesar y transmitir datos, además de tener aplicaciones importantes en ciberseguridad y criptografía.



"El entrelazamiento cuántico es un fenómeno que no tiene ninguna similitud con lo conocido en el mundo clásico."



Figura 4. Observación de los estados de superposición y entrelazamiento cuántico. Nota: Alicia y Beto tienen cada uno una caja con una pelota cuántica, y las pelotas cuánticas de Alicia y Beto están entrelazadas. Cuando Alicia abre la caja y observa su pelota, el estado de superposición desaparece y observa solo un color. Por otro lado, cuando Beto abre su caja observa que el color de su pelota es el opuesto al color de la pelota de Alicia. Los colores que observan Alicia y Beto siempre están correlacionados. Este fenómeno se conoce como entrelazamiento.

Desafortunadamente, procesar información mediante superposición y entrelazamiento tiene la desventaja de que el tiempo en el que un qubit permanece en estado cuántico es, en el mejor de los casos, de solo unos milisegundos. Después de este periodo, el qubit pierde su estado de superposición y entrelazamiento, lo que provoca la pérdida de la información que estaba procesando.

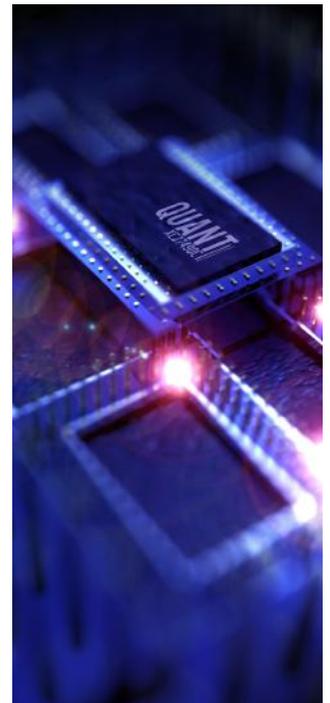
La pérdida de superposición y entrelazamiento se debe a un fenómeno conocido como decoherencia cuántica, que ocurre cuando el sistema cuántico se entrelaza con su entorno. Esto provoca que los estados cuánticos evolucionen hacia un estado completamente definido de manera clásica. Según esta interpretación, la decoherencia surge de la interacción entre el qubit y el ambiente, y cuanto más intensa sea esa interacción, más rápidamente el qubit pierde su superposición y entrelazamiento, estabilizándose en su estado de menor energía.



Otro ejemplo de aplicación de la Termodinámica es la refrigeración de qubits ya que se busca mantenerlos a temperaturas muy bajas, cercanas al cero absoluto, para prevenir la decoherencia. La Termodinámica se utiliza para diseñar sistemas de refrigeración en entornos cuánticos, lo que garantiza que los qubits puedan operar de manera óptima y estable.

Procesos de decoherencia desde el punto de vista de SEAQT

Una manera de estudiar el tiempo en que un qubit pierde su estado de superposición y su entrelazamiento con otros es a través de una teoría que considere cómo estos interactúan con su entorno. Esta teoría se conoce como Mecánica Cuántica de Sistemas Abiertos. En ella, la evolución de los estados cuánticos se describe mediante la ecuación de Lindblad, que propone que, cuando hay una interacción débil entre el entorno y el qubit, este comienza a ceder parte de su energía hacia el ambiente, lo que provoca la pérdida de su estado de superposición. Sin embargo, esta teoría sugiere que la decoherencia es causada únicamente por las interacciones con el entorno. Desde una perspectiva Termodinámica, las irreversibilidades son consecuencia directa de esta interacción.

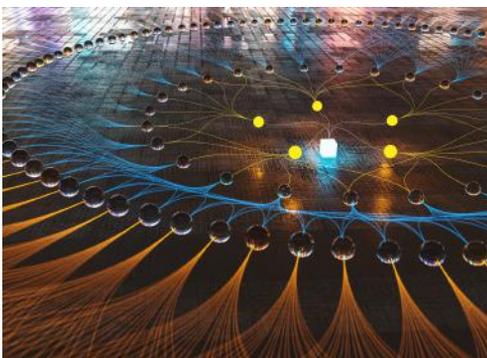
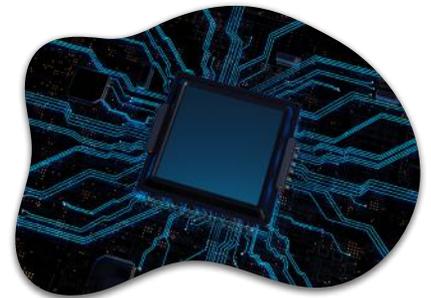


En los últimos años, se ha propuesto un marco de estudio donde el uso de conceptos termodinámicos para describir procesos cuánticos facilita la comprensión de fenómenos fuera del equilibrio sin necesidad de considerar interacciones con el entorno. Esta formulación sugiere que



los postulados de la Mecánica Cuántica se complementan con la idea de que los estados cuánticos deben evolucionar en la dirección de máximo ascenso de entropía (Steepest-Entropy-Ascent o SEA). A través de esta consideración, se puede entender que el proceso de decoherencia es ocasionado por las irreversibilidades intrínsecas que ocurren en el sistema, además de las irreversibilidades que puedan ocurrir debido a las interacciones con el ambiente. A diferencia de las ecuaciones maestras de la Mecánica Cuántica de Sistemas Abiertos, aquí se propone que las irreversibilidades son inevitables y propias de los sistemas cuánticos. El proceso de decoherencia, en este caso, está relacionado con estas irreversibilidades intrínsecas, que son evaluadas mediante la generación de entropía. Si bien la pérdida de coherencia debida al ambiente puede ser controlada mediante técnicas como la refrigeración, las irreversibilidades intrínsecas son imposibles de evitar, lo que plantea un desafío para la creación de sistemas cuánticos robustos capaces de preservar la información durante más tiempo.

Viéndolo desde esta perspectiva, se puede inferir que la decoherencia es algo que siempre va a estar presente en los dispositivos cuánticos, por lo que podríamos hacernos la pregunta: ¿qué se puede hacer para mantener la coherencia el mayor tiempo posible?



Este es un gran reto al que se enfrentan los científicos actualmente. Una de las propuestas con mayor proyección a futuro para dar solución a esta problemática es a través del desarrollo de materiales avanzados que sean capaces de conservar un estado de coherencia el mayor tiempo posible.



Otra de las propuestas consiste en variar y mejorar el diseño de los qubits de manera que se pueda encontrar una opción diferente y más eficiente de procesar la información, y esto se ve reflejado en la gran cantidad de configuraciones de qubits que existen, donde destacan los circuitos superconductores a escalas microscópicas, la manipulación de fotones y los qubits topológicos.

Finalmente, se puede corregir el ruido generado en un algoritmo cuántico realizando diseños de qubits que sean capaces de procesar la información de forma eficiente y en un tiempo menor al que le toma al qubit perder su estado de coherencia. Actualmente, es un reto lograr esto, sobre todo manteniendo los costos de energía equiparables con el consumo energético de los sistemas de cómputo clásicos.



Prospectiva

A pesar de los avances en la aplicación de la Termodinámica en la Computación Cuántica, existen desafíos importantes en su implementación práctica.

Además, mantener qubits y componentes cuánticos a temperaturas criogénicas es costoso y técnicamente desafiante. Los sistemas de refrigeración eficientes son esenciales, pero aún se necesita mayor investigación para reducir costos y complejidades.

Por otro lado, la interacción con el entorno puede causar decoherencia, lo que limita la duración de la información cuántica. Reducir la decoherencia es esencial para lograr qubits más estables y operativos.

La transición de construir sistemas cuánticos de uno o dos qubits a sistemas con un mayor número de éstos representa un desafío significativo para la ciencia. Es necesario profundizar en la investigación en este campo para lograr una interconexión de múltiples qubits. 🍀



Agradecimientos

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT), México, por su apoyo con la beca nacional para estudios de posgrado (CVU 1146619). Los demás autores también agradecen al CONAHCyT por su apoyo a través del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII).

Para Consulta

- Aspect A, Grungier P, Roger G. 1982. Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm gedankenexperiment: A new violation of Bell's inequalities. *Physical Review Letters* 49(2): 91-94.
- Aspect A. 1999. Bell's inequality test: More ideal than ever. *Nature* 398(6724): 189-90.
- Clauser JF, Horne MA, Shimony A, et al. 1969. Proposed experiment to test local hidden-variable theories. *Physical Review Letters* 23(15): 880.
- Clauser JF. 1974. Experimental distinction between the quantum and classical field-theoretic predictions for the photoelectric effect. *Physical Review D* 9(4): 853.



- Bell JS. 1964. On the Einstein Podolsky Rosen paradox. Phys Physique Fizika 1(3): 195.
- Bell JS. 1966. On the problem of hidden variables in quantum mechanics. Reviews of Modern Physics 38(3): 447.
- Bell JS. 1985. The theory of local beables. Dialectica 39: 86-96.

Crédito de imágenes en orden de aparición: Visula Co, Kalawin (Getty Images, GI), grebeshkov, mysticminimals (mysticminimals), sceptical cactus, da-kuk (Getty Images Signature, GIS), Pexels (pixabay), jieffeng jiang (GI), metamorworks (GI), PhonlamaiPhoto's Images, Tony Melov (GI), sakkmasterke (GI), Chayanan (GI), amethyststudio (amethyststudio), olia danilevich (Pexels, P), Science Photo Library, agsandrew (GI), alexsl (GIS), Markus Spiske (P), Adeel Anjum (EncoderXSolutions), PhonlamaiPhoto's Images, Petrikovvy, welcomania, Just_Super (GIS), angel_nt (GI), gremlin (GIS), Anadmist (GI), MF3d (GIS), bluebay2014 (Getty Images Pro), Pravokrugulnik, dani3315 (GI), is1003. Crédito de figuras: Proporcionadas por los autores. Los autores utilizaron ChatGPT y confirmaron que ningún párrafo del manuscrito ha sido generado completamente o con más del 50% de sus palabras con esta herramienta.

Dra. Beatriz Escobar Morales
Editor Asociado Revista CyN

Diseño: Isis G. Tovar De La Cruz



Luis E. Rocha Soto

Estudiante de doctorado en ingeniería mecánica, Universidad de Guanajuato. Mi investigación se centra en el estudio de la termodinámica fuera del equilibrio y su aplicación en las maquinas térmicas a escala cuántica. **Contacto:** le.rochasoto@ugto.mx



Cesar E. Damián Ascencio

Profesor del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Guanajuato, Salamanca, Gto. Mis áreas de especialidad son física teórica, termodinámica de no equilibrio de sistemas microscópicos y macroscópicos. **Contacto:** cesar.damian@ugto.mx



Adriana Saldaña Robles

Directora y profesora del Departamento de Ingeniería Agrícola, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato, Irapuato, Gto. Áreas de investigación en materiales para remover contaminantes, modelado ambiental, estudios relacionados con adsorción, análisis de imágenes y termodinámica. **Contacto:** adriana.saldana@ugto.mx



Sergio Cano Andrade

Profesor en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Guanajuato, Salamanca, Gto. Mi investigación es en el área de análisis de sistemas termodinámicos a nivel microscópico y macroscópico. **Contacto:** sergio.cano@ugto.mx