

Baterías Cuánticas: Principios, Progreso y Perspectivas en el Almacenamiento de Energía de Próxima Generación

Introducción: Redefiniendo el Almacenamiento de Energía con la Mecánica Cuántica

Definiendo la Batería Cuántica: Más Allá de la Electroquímica Clásica

Una batería cuántica se define formalmente como un sistema de mecánica cuántica diseñado para almacenar y liberar energía, aprovechando principios fundamentales como la superposición y el entrelazamiento.¹ A diferencia de las baterías convencionales, que dependen de reacciones electroquímicas para transportar iones y electrones entre un ánodo y un cátodo, las baterías cuánticas almacenan energía en los estados excitados de sistemas cuánticos. Estos sistemas pueden ser, por ejemplo, conjuntos de sistemas de dos niveles (TLS, por sus siglas en inglés) o cúbits, que se cargan a menudo mediante la absorción de fotones.³

La unidad fundamental de almacenamiento no es una celda electroquímica, sino un sistema cuántico individual descrito por un Hamiltoniano local, h_i . La batería completa, compuesta por N de estas unidades, se describe mediante un Hamiltoniano total que es la suma de estos componentes: $H = \sum_i h_i$.³ Esta estructura es el análogo cuántico directo de una batería clásica compuesta por múltiples celdas.

El Concepto de "Ventaja Cuántica": Escalado Superextensivo y Potencia Mejorada

La principal motivación que impulsa la investigación de las baterías cuánticas es el potencial de una "ventaja cuántica".⁶ Esta ventaja se manifiesta de manera más notable como una **potencia de carga superextensiva**, donde la potencia de carga, P , escala más rápido que linealmente con el número de celdas de la batería, N . Matemáticamente, esto se expresa como $P \propto N^\alpha$ con $\alpha > 1$.⁸

Este comportamiento representa una desviación radical de las baterías clásicas, cuyas celdas se cargan en paralelo, lo que resulta en una potencia de carga que escala linealmente con el

número de celdas ($P \propto N$).⁶ Esta propiedad contraintuitiva implica que, en el dominio cuántico, una batería más grande puede cargarse de forma desproporcionadamente más rápida.⁵ Por ejemplo, un coche eléctrico con una batería de 200 celdas, si se cargara mediante un protocolo cuántico colectivo, teóricamente podría reducir su tiempo de carga en un factor de hasta 200 en comparación con la carga paralela convencional.⁴

Panorama del Campo: De Postulados Teóricos a Pruebas de Concepto Experimentales

El concepto de batería cuántica fue propuesto formalmente por primera vez por Alicki y Fannes en 2013, con raíces en la termodinámica cuántica y la teoría de la información.¹ Desde entonces, el campo ha evolucionado desde modelos teóricos iniciales, como el modelo de Dicke, hacia sistemas más complejos y caóticos, como el modelo Sachdev-Ye-Kitaev (SYK), que demuestran una ventaja cuántica más robusta.¹

Fundamentalmente, el campo ha trascendido el ámbito puramente teórico. En los últimos años se han realizado las primeras demostraciones experimentales de prueba de concepto, validando conceptos clave como la superabsorción tanto en entornos criogénicos como, de manera significativa, a temperatura ambiente.⁸ Este informe traza esta trayectoria, desde el marco matemático abstracto hasta los resultados tangibles de laboratorio.

La noción de "ventaja cuántica" ha evolucionado y se ha vuelto más rigurosa con el tiempo. Las investigaciones iniciales, en particular las centradas en el modelo de Dicke, a menudo equiparaban cualquier aceleración colectiva (es decir, un escalado superextensivo) con una ventaja intrínsecamente cuántica.⁶ Sin embargo, análisis posteriores revelaron que ciertos efectos colectivos también pueden existir en los análogos

clásicos de estos sistemas de muchos cuerpos. Esto llevó a la comprensión de que no todo escalado superextensivo es un fenómeno exclusivamente cuántico.⁶ En consecuencia, se estableció una definición más estricta: una

ventaja cuántica genuina existe solo si el impulso de carga colectivo en el modelo cuántico (Γ_Q) es demostrablemente mayor que el de su contraparte clásica (Γ_C), es decir, cuando la relación $\Gamma_Q/\Gamma_C > 1$.⁶ Esta distinción es crucial, ya que separa las ventajas que surgen simplemente de las interacciones de muchos cuerpos (que pueden ser clásicas) de aquellas que se originan en recursos únicamente cuánticos, como el entrelazamiento y las correlaciones no locales. El modelo SYK, por ejemplo, destaca por exhibir esta ventaja cuántica genuina, vinculando la mejora de la potencia a "atajos" a través del espacio de Hilbert que son posibles gracias a estados altamente entrelazados.⁷

Tabla 1: Baterías Clásicas vs. Cuánticas - Un Análisis Comparativo

| Característica | Batería Clásica | Batería Cuántica |
|-----------------------------|--------------------------|-------------------------------------------|
| Portador de Energía | Iones / Electrones | Fotones / Cuasipartículas |
| Mecanismo de Almacenamiento | Potencial electroquímico | Niveles de energía cuantizados (ej. TLSs) |

| | | |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Principio de Carga | Carga en paralelo (celdas aisladas) | Carga colectiva (celdas acopladas) |
| Escalado de Potencia de Carga (P vs. N celdas) | $P \propto N$ (Lineal) | $P \propto N^\alpha$ con $\alpha > 1$ (Superextensivo) |
| Principio Habilitador Clave | Electroquímica | Coherencia cuántica (Superposición/Entrelazamiento) |
| Desafío Principal | Degradación de materiales / Crecimiento de dendritas | Decoherencia / Ruido ambiental |

El Marco de la Mecánica Cuántica para el Almacenamiento de Energía

Estados y Superposición: Almacenando Energía en el Espacio de Hilbert

El estado de un sistema cuántico se representa mediante un vector, denotado como $|\psi\rangle$, en un espacio vectorial complejo conocido como espacio de Hilbert, H .¹⁶ Este espacio proporciona el escenario matemático fundamental en el que opera la mecánica cuántica. Un principio central es la **superposición**, que establece que si $|\psi_1\rangle$ y $|\psi_2\rangle$ son estados válidos del sistema, entonces cualquier combinación lineal de la forma $|\psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$ (donde c_1 y c_2 son números complejos) también es un estado válido.²⁰

En el contexto de una batería cuántica, este principio implica que la energía puede almacenarse no solo en estados discretos definidos, como el "estado fundamental" (descargado) o un "estado excitado" (cargado), sino en una superposición coherente de múltiples estados energéticos simultáneamente.² Esta capacidad es una desviación fundamental de los bits clásicos, que solo pueden ser 0 o 1, y es una de las claves de las capacidades mejoradas de la batería.

Entrelazamiento y Estados Colectivos: El Papel del Producto Tensorial

Cuando se considera un sistema compuesto por N celdas de batería, el espacio de estados total del sistema se construye mediante el **producto tensorial** de los espacios de Hilbert de las celdas individuales: $H = H_1 \otimes H_2 \otimes \dots \otimes H_N$.¹⁷ Dentro de este vasto espacio compuesto, pueden existir estados especiales conocidos como estados **entrelazados**. Un estado está entrelazado si no puede ser factorizado como un simple producto de los estados de sus celdas individuales; su naturaleza es inherentemente colectiva y no local.²⁶

El entrelazamiento no es una mera curiosidad teórica, sino un recurso físico crítico. Permite

que las celdas de la batería actúen de manera correlacionada y colectiva, lo que constituye el origen físico de fenómenos como la superabsorción y la carga superextensiva.² El entrelazamiento facilita la transferencia de energía entre las celdas sin necesidad de contacto físico directo y habilita los "atajos" a través del espacio de Hilbert que conducen a una carga más rápida.²

Dinámica del Sistema: El Operador Hamiltoniano y los Protocolos de Carga

La evolución temporal del estado de la batería, $|\psi(t)\rangle$, está gobernada por la **ecuación de Schrödinger**: $i\hbar \frac{d}{dt}|\psi(t)\rangle = H(t)|\psi(t)\rangle$.¹⁷ El **operador Hamiltoniano**, H , representa la energía total del sistema.³⁰ En un protocolo de carga típico, el Hamiltoniano se compone de tres partes: el Hamiltoniano interno de la batería (H_B), el Hamiltoniano del cargador (H_C) y un término de interacción (H_{int}) que media la transferencia de energía: $H = H_B + H_C + H_{int}$.¹

Un proceso de carga se inicia "activando" el término de interacción H_{int} durante un intervalo de tiempo τ_c . Para que la energía se transfiera eficazmente a la batería, es necesario que el Hamiltoniano de interacción no conmute con el Hamiltoniano de la batería, es decir, $[H_{int}, H_B] \neq 0$.³ Esta condición de no conmutación es el requisito matemático que garantiza que la interacción puede alterar la energía de la batería.

El propio formalismo matemático de la mecánica cuántica es lo que permite la posibilidad de una "ventaja cuántica". En la mecánica clásica, el estado de un sistema de N partículas es un punto en un espacio de fases de $6N$ dimensiones, donde las propiedades son locales y la evolución determinista.³³ En cambio, el espacio de estados para una batería cuántica de N celdas es un espacio producto tensorial, $H = \otimes_i H_i$, cuya dimensión crece *exponencialmente* con N .³⁵ Esta inmensidad del espacio de Hilbert permite la existencia de estados entrelazados altamente no clásicos. La dinámica de carga, regida por un Hamiltoniano global H que actúa sobre todo este espacio colectivo, puede navegar por este vasto paisaje de estados de maneras inaccesibles para los sistemas clásicos. Las operaciones entrelazantes, representadas por términos específicos de H_{int} , pueden crear "atajos" entre el estado inicial (descargado) y el final (cargado).⁷ Por lo tanto, es la estructura matemática —específicamente la estructura de producto tensorial del espacio de estados y la existencia de Hamiltonianos globales y entrelazantes— la que crea la posibilidad de fenómenos colectivos y superextensivos que superan a cualquier proceso clásico en paralelo.

Termodinámica y Métricas de Rendimiento de las Baterías Cuánticas

Energía Almacenada y Potencia de Carga

Las métricas de rendimiento fundamentales para una batería cuántica se definen en el marco de la termodinámica cuántica. La **energía almacenada** en un tiempo t , $E(t)$, se define como el cambio en el valor esperado del Hamiltoniano interno de la batería: $E(t) = \text{Tr}[\rho(t)H] - \text{Tr}[\rho(0)H]$, donde $\rho(t)$ es el estado del sistema (descrito por una matriz de densidad) en el tiempo t , y $\rho(0)$ es su estado inicial.³ La **potencia de carga media** durante un intervalo de tiempo τ se calcula simplemente como $P(\tau) = E(\tau)/\tau$.³ El objetivo principal de los protocolos de carga es maximizar esta cantidad.

Ergotropía: El Trabajo Máximo Extraíble

No toda la energía almacenada en un sistema cuántico es necesariamente útil o accesible. La **ergotropía**, denotada como E , es una métrica termodinámica clave que cuantifica la cantidad máxima de energía que puede ser extraída de un estado cuántico ρ a través de operaciones unitarias, que son procesos reversibles y que conservan la energía.¹ Se define matemáticamente como:

$$E(\rho) = \text{Tr}[\rho H] - \min_{\sigma} \text{Tr}[\sigma H]$$

donde la minimización se realiza sobre todas las posibles transformaciones unitarias U .³⁶ La ergotropía representa, por tanto, el trabajo genuinamente "disponible" que se puede obtener de la batería.

Estados Pasivos y Energía Bloqueada

El estado que minimiza la energía tras la optimización sobre todas las operaciones unitarias se denomina **estado pasivo**. Un estado es pasivo si conmuta con el Hamiltoniano del sistema y si sus poblaciones en la base de autoestados de energía están ordenadas de forma no creciente con la energía.³⁶ Los estados de equilibrio térmico son siempre pasivos.

La diferencia entre la energía total almacenada y la ergotropía se conoce como **energía bloqueada**. Esta energía está "atrapada" en la batería debido a correlaciones cuánticas, como el entrelazamiento con el cargador o el entorno, y no puede ser extraída mediante procesos unitarios cíclicos.³⁷

Esto revela que el entrelazamiento es una herramienta de doble filo en el diseño de baterías cuánticas. Por un lado, el entrelazamiento *entre las celdas de la batería* es un recurso fundamental que permite los efectos colectivos y la carga rápida.² Por otro lado, la investigación demuestra que el entrelazamiento residual

entre la batería y el cargador al final del proceso de carga es perjudicial.³⁷ Esta correlación no deseada está directamente relacionada con un aumento de la energía bloqueada, es decir, energía que se almacena en el sistema combinado pero que es inaccesible para la batería por sí sola.³⁷ Por lo tanto, un protocolo de carga óptimo debe gestionar un delicado equilibrio: fomentar activamente el entrelazamiento

dentro de la batería para acelerar la carga, mientras se minimiza el entrelazamiento residual *con* el cargador para maximizar el trabajo útil extraíble (ergotropía).

Mecanismos Físicos de Carga Mejorada

Superabsorción y Efectos Colectivos

La **superabsorción** es el proceso inverso a la superradiancia y describe un efecto cuántico colectivo en el que un conjunto de N moléculas o átomos puede absorber luz a una velocidad que escala más rápido que N .¹¹ Este fenómeno ocurre porque las moléculas, cuando están acopladas a través de un campo de luz común (por ejemplo, dentro de una microcavidad), no actúan de forma independiente. En su lugar, forman estados colectivos y superpuestos que poseen un momento dipolar de transición mucho mayor, lo que conduce a un acoplamiento luz-materia mejorado.⁵

Este mecanismo es la causa directa de la potencia de carga superextensiva. El tiempo de carga, τ_c , puede escalar inversamente con el número de moléculas, por ejemplo como $1/N$, lo que resulta en una potencia de carga $P \propto N/\tau_c$ que crece más rápido que N .¹⁴

El Papel del Entrelazamiento en la Mediación de la Transferencia Coherente de Energía

El entrelazamiento es el recurso fundamental que posibilita el comportamiento colectivo observado en la superabsorción.²⁸ Al entrelazar las celdas de la batería, el proceso de carga puede acceder a una porción mucho mayor del espacio de Hilbert colectivo. Diversos estudios muestran una correspondencia directa entre la cantidad de entrelazamiento generado entre las celdas de la batería y la ergotropía (energía extraíble).²⁸ Un mayor entrelazamiento conduce a una transferencia de energía más eficaz.²⁸

Protocolos emergentes como la Teleportación Cuántica de Energía (QET) explotan explícitamente el entrelazamiento preexistente para lograr una carga de energía instantánea utilizando únicamente operaciones locales y comunicación clásica (LOCC), lo que demuestra el poder del entrelazamiento como recurso consumible.⁴⁰

Aprovechando la Disipación: El Papel Contraintuitivo de la Decoherencia Controlada

La decoherencia, es decir, la pérdida de las propiedades cuánticas debido a la interacción con un entorno, es típicamente el principal obstáculo para el desarrollo de tecnologías cuánticas.⁴² Sin embargo, trabajos teóricos recientes han demostrado que la **defase controlada**, un tipo específico de decoherencia, puede ser aprovechada para *acelerar* el proceso de carga.⁴²

El mecanismo subyacente implica un equilibrio delicado. Con muy poca defase, la energía

oscila lentamente entre el cargador y la batería. Con demasiada defase, el sistema se "congela" debido al efecto Zeno cuántico, deteniendo la transferencia de energía. Sin embargo, un nivel óptimo e ingeniado de defase puede romper el ciclo oscilatorio en el punto de máxima carga de la batería, estabilizando la energía almacenada y acelerando eficazmente la tasa de carga neta.⁴² Este hallazgo representa un cambio de paradigma, pasando de ver el entorno como un adversario a considerarlo un aliado potencial en el diseño de protocolos de carga.

Arquitecturas Teóricas de Baterías Cuánticas

El Modelo de Dicke

El modelo de Dicke es una de las arquitecturas teóricas fundacionales para las baterías cuánticas. Describe un sistema de N sistemas de dos niveles (TLSs), como espines atómicos, acoplados a un único modo de un campo electromagnético resonante dentro de una cavidad.¹ Este modelo es central en el estudio de la **superradiancia**, un fenómeno de emisión colectiva y coherente de luz.⁴⁵ En un protocolo de carga de Dicke, la energía se almacena inicialmente en el campo de la cavidad. Al activar el acoplamiento luz-materia, se produce una transferencia de energía coherente y periódica desde la cavidad hacia los TLSs. El acoplamiento se desactiva en el momento en que la energía almacenada en los TLSs alcanza su máximo.⁴⁴

Los estudios iniciales de este modelo sugirieron un escalado de potencia de carga superextensivo de $P \propto N^{3/2}$.³⁹ Sin embargo, análisis posteriores demostraron que una formulación termodinámicamente consistente del Hamiltoniano del modelo de Dicke no proporciona una ventaja cuántica genuina sobre su análogo clásico.¹ La ventaja observada es un efecto colectivo, pero no exclusivamente cuántico. A pesar de esta matización, el modelo de Dicke sigue siendo un sistema crucial y experimentalmente relevante.

El Modelo Sachdev-Ye-Kitaev (SYK)

El modelo SYK representa un paradigma de la física de la materia condensada y la física de altas energías. Describe un sistema de N fermiones de Majorana con interacciones aleatorias de todos con todos. Es un modelo emblemático del caos cuántico de muchos cuerpos, que describe una fase de "metal extraño" sin excitaciones de cuasipartículas, y posee una dualidad holográfica con agujeros negros cuánticos en el espacio-tiempo AdS_2 .⁷

En el contexto de las baterías cuánticas, el modelo SYK es significativo por ser el primer modelo de muchos cuerpos que demuestra una **ventaja cuántica genuina** y robusta.¹ La ventaja en la potencia de carga superextensiva se atribuye a efectos puramente cuánticos. Esta mejora está vinculada a la naturaleza del modelo como un "fast scrambler", lo que significa que distribuye la información cuántica a través del sistema a la máxima velocidad

posible. Esto permite que el proceso de carga tome atajos a través del vasto espacio de Hilbert mediante la creación de estados altamente entrelazados.⁷ Estudios analíticos y numéricos han demostrado que la ventaja cuántica escala con el número de celdas N , donde el exponente exacto depende de la conectividad y el orden de las interacciones dentro del modelo SYK.⁵⁰

Protocolos Emergentes

Más allá de los modelos de carga dinámica, han surgido nuevos protocolos. La **Teleportación Cuántica de Energía (QET)** es un ejemplo notable. Este protocolo utiliza un entrelazamiento preexistente compartido entre dos partes (Alice y Bob) para transferir energía de Alice a Bob utilizando únicamente operaciones locales y comunicación clásica (LOCC). Este método permite una carga "instantánea" y puede incluso hacer que la densidad de energía local de Bob supere el máximo clásico.⁴⁰ Esto representa un paradigma diferente, donde el entrelazamiento actúa como un recurso consumible en lugar de ser generado dinámicamente durante la carga.

Tabla 2: Principales Modelos Teóricos de Baterías Cuánticas

| Modelo | Sistema Físico | Tipo de Interacción | Fenómeno Clave | Escalado de Potencia de Carga (P) | Estatus |
|--------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| El Modelo de Dicke | N Sistemas de Dos Niveles (TLSs) en una cavidad resonante | Acoplamiento colectivo luz-materia | Superradiancia / Superabsorción | $\propto N^{3/2}$ (ventaja colectiva, no genuinamente cuántica) | Relevante experimentalmente, modelo fundacional |
| El Modelo SYK | N fermiones de Majorana interactuantes | Interacciones aleatorias de q -cuerpos de todos con todos | Caos cuántico de muchos cuerpos / <i>Fast scrambling</i> | $\propto N\alpha$ con $\alpha > 1$ (ventaja cuántica genuina) | Principalmente teórico, referencia para el caos cuántico |

Progreso Experimental y Prototipos

Demostraciones a Temperatura Ambiente

La viabilidad de las baterías cuánticas a temperatura ambiente es crucial para su aplicación a gran escala. Los avances recientes en esta área son particularmente prometedores.

- **Microcavidades Orgánicas:** La primera demostración experimental de superabsorción se logró utilizando moléculas de colorante orgánico (Lumogen-F Orange) dispuestas entre dos espejos para formar una microcavidad.⁵ Al excitar la cavidad con un láser, los investigadores observaron que el tiempo de carga disminuía a medida que aumentaba el número de moléculas, una firma inequívoca de la carga superextensiva.¹⁴
- **Extensión de los Tiempos de Almacenamiento:** Un desafío importante es que la superradiancia también implica una *descarga* superrápida. Un avance reciente abordó este problema combinando la capa superabsorbente con una capa de estados triplete moleculares. La energía se absorbe rápidamente en los estados singlete y luego se transfiere a los estados triplete de larga duración (en la escala de microsegundos a segundos), lo que aumenta la vida útil del almacenamiento de energía en un factor de 1000.¹³
- **Resonancia Magnética Nuclear (RMN):** Se han utilizado plataformas de RMN para explorar la dinámica energética en sistemas de espines, demostrando una ventaja en la potencia de carga proporcional a N y logrando tiempos de almacenamiento de hasta 2 minutos en un sistema de 38 espines.⁸

Plataformas Criogénicas

A temperaturas extremadamente bajas, la decoherencia se suprime, lo que permite investigar efectos cuánticos más sutiles y controlar los sistemas con mayor precisión.

- **Circuitos Superconductores:** Se han construido prototipos que utilizan qubits superconductores (sistemas de tres niveles) acoplados a una cavidad. Aunque estos sistemas de una sola unidad no demuestran una ventaja colectiva, son cruciales para desarrollar las técnicas de control necesarias para futuras baterías multicelda y para su posible integración con ordenadores cuánticos superconductores.⁸
- **Puntos Cuánticos:** Se han realizado experimentos que estudian la transferencia de energía entre un punto cuántico (cargador) y un reservorio de modo electromagnético (batería) a temperaturas criogénicas (5-20 K).⁸
- **Iones Atrapados:** Propuestas y experimentos recientes exploran el uso de cadenas de iones atrapados acoplados a un oscilador mecánico como plataforma para baterías cuánticas. Esto permite un control de alta precisión y la investigación del papel de las interacciones y los términos contrarrotantes en el Hamiltoniano.⁵³
- **Ordenadores Cuánticos como Bancos de Pruebas:** Las plataformas de computación cuántica existentes (por ejemplo, IBM Q) se están utilizando para simular y probar protocolos de carga de baterías cuánticas. Esto permite la creación rápida de prototipos de protocolos complejos y ha revelado que incluso los errores en la preparación de estados pueden, en ocasiones, mejorar el rendimiento de la batería.⁸

Una observación clave que surge de la investigación experimental es una bifurcación en los objetivos de aplicación. Los sistemas a temperatura ambiente, como las moléculas orgánicas y la RMN, se perfilan como candidatos para ser escalados y alimentar dispositivos

convencionales, mejorar las células solares y operar en condiciones menos restrictivas.⁵ Por otro lado, los sistemas criogénicos, como los circuitos superconductores y los iones atrapados, son intrínsecamente más frágiles y requieren condiciones de operación extremas, lo que los hace inadecuados para la electrónica de consumo.⁸ Sin embargo, estas plataformas son las mismas que se utilizan para construir ordenadores cuánticos. La investigación sugiere explícitamente que su aplicación más probable será la de interactuar y alimentar otras tecnologías cuánticas, como proporcionar energía reversible para puertas lógicas cuánticas.² Por lo tanto, el campo no persigue un único tipo de "batería cuántica", sino que se está diversificando en dos trayectorias tecnológicas distintas: una dirigida a aplicaciones de alta potencia y macroescala, y otra a fuentes de alimentación de alta precisión e integradas de cuántico a cuántico.

Desafíos Críticos y Perspectivas Futuras

La Lucha Contra la Decoherencia

El principal desafío para la realización de baterías cuánticas funcionales es la decoherencia: la pérdida de coherencia y entrelazamiento cuántico debido a interacciones no deseadas con el entorno.⁴² Este problema es especialmente agudo en los sistemas a temperatura ambiente, donde las fluctuaciones térmicas pueden destruir rápidamente los frágiles estados cuánticos.⁸ Aunque se ha demostrado que la decoherencia controlada puede ser beneficiosa, el ruido ambiental incontrolado conduce a la pérdida de energía y degrada el rendimiento.³⁶ El desarrollo de materiales y arquitecturas robustas frente al ruido ambiental es, por tanto, una prioridad fundamental.

Escalabilidad y Fabricación

Los prototipos actuales son dispositivos a nanoescala de prueba de concepto.⁸ Escalar estos sistemas desde unas pocas moléculas o cúbits hasta un dispositivo capaz de almacenar una cantidad de energía significativa representa un enorme desafío de ingeniería.¹³ La fabricación en masa de estructuras complejas, como microcavidades ópticas de alta calidad, también presenta obstáculos considerables.¹³

Extracción de Energía e Interfaz

Almacenar energía es solo la mitad del problema. La extracción eficiente de esta energía y su conversión del dominio cuántico (por ejemplo, estados moleculares excitados) a electricidad clásica utilizable es un desafío no trivial que ha sido menos estudiado que el proceso de carga.⁵ Esto requiere la incorporación de capas conductoras u otros mecanismos para transferir la energía del sistema cuántico a un circuito externo, lo que puede introducir nuevos

canales de pérdida y comprometer la eficiencia del dispositivo.⁵

Aplicaciones Futuras

A pesar de los desafíos, las perspectivas para las baterías cuánticas son diversas y potencialmente transformadoras, siguiendo la bifurcación identificada previamente:

- **Alimentación de Tecnologías Cuánticas:** La aplicación más inmediata y prometedora es el uso de baterías cuánticas criogénicas como fuentes de energía coherentes e integradas en chip para ordenadores cuánticos. Esto podría permitir la operación de puertas lógicas cuánticas reversibles y de baja disipación, un componente clave para la computación cuántica a gran escala.²
- **Mejora de la Energía Solar:** Las baterías cuánticas a temperatura ambiente basadas en la superabsorción podrían mejorar drásticamente la eficiencia de los dispositivos de recolección de luz, como las células solares, al capturar fotones de manera más rápida y colectiva.⁵
- **Electrónica de Consumo y Vehículos Eléctricos:** Aunque es una visión a más largo plazo, la promesa de una carga casi instantánea convierte a las baterías cuánticas en un objetivo para futuras generaciones de dispositivos electrónicos portátiles y vehículos eléctricos.⁴ Sin embargo, esto requerirá avances significativos en la vida útil del almacenamiento, la densidad de energía y la eficiencia de extracción.

Conclusión: El Amanecer de la Era de la Energía Cuántica

Síntesis del Estado del Arte Actual

Las baterías cuánticas han transitado de ser un concepto puramente teórico a un campo de investigación experimental tangible y dinámico. La investigación ha validado el principio fundamental de que los efectos cuánticos colectivos, habilitados por el entrelazamiento, pueden superar las limitaciones clásicas de la carga en paralelo, dando lugar a una ventaja de potencia superextensiva. Los modelos teóricos, desde el canónico modelo de Dicke hasta los caóticos sistemas SYK, han proporcionado un marco robusto para comprender los mecanismos subyacentes, mientras que los prototipos experimentales, tanto a temperatura ambiente como en condiciones criogénicas, han demostrado que estos efectos no son meras curiosidades matemáticas.

Evaluación Final del Potencial Transformador

La tecnología de las baterías cuánticas se encuentra en un punto de inflexión crítico. El impacto a corto plazo probablemente se sentirá dentro del propio ecosistema cuántico,

donde podrían revolucionar la forma en que se diseñan y alimentan los ordenadores y sensores cuánticos. El potencial a largo plazo para transformar el almacenamiento de energía convencional es inmenso, pero depende de la superación de los profundos desafíos de la decoherencia, la escalabilidad y la extracción de energía. En última instancia, el campo de las baterías cuánticas representa un replanteamiento fundamental del almacenamiento de energía, basado en los principios más profundos de la física moderna, y promete abrir una nueva frontera en la búsqueda de soluciones energéticas eficientes y sostenibles.

Obras citadas

1. en.wikipedia.org, fecha de acceso: julio 19, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_battery
2. Quantum Battery Team - CSIRO Research, fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://research.csiro.au/quantumbattery/research/quantum-batteries/>
3. Quantum Batteries: A Materials Science Perspective - PMC, fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12038544/>
4. Quantum battery VS Lithium-ion battery - Advances in Engineering Innovation, fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://www.ewadirect.com/journal/aei/article/view/15482>
5. Quantum batteries: rethinking energy storage is possible - Polytechnique Insights, fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://www.polytechnique-insights.com/en/columns/science/quantum-batteries-rethinking-energy-storage-is-possible/>
6. Quantum versus classical many-body batteries | Phys. Rev. B, fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.99.205437>
7. Quantum Advantage in the Charging Process of Sachdev-Ye-Kitaev Batteries | Phys. Rev. Lett. - Physical Review Link Manager, fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.125.236402>
8. Quantum batteries – The future of energy storage? - arXiv, fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://arxiv.org/pdf/2310.13020>
9. Supercharged!: Advances in Superabsorbance for the Development of Quantum Batteries - Chemistry | Illinois, fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://chemistry.illinois.edu/system/files/2022-11/Brandon%20Rasmussen%20Lit%20Seminar%20Abstract.pdf>
10. Quantum batteries could give off more energy than they store : r/Futurology - Reddit, fecha de acceso: julio 19, 2025, https://www.reddit.com/r/Futurology/comments/1gogj63/quantum_batteries_could_give_off_more_energy_than/
11. Quantum batteries closer with superabsorption breakthrough - Cosmos Magazine, fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://cosmosmagazine.com/science/physics/quantum-batteries-breakthrough-superabsorption/>
12. arXiv:2405.03093v1 [quant-ph] 6 May 2024, fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://arxiv.org/pdf/2405.03093>
13. Quantum Batteries: Powering Into the Future? - Energy Matters, fecha de acceso:

- julio 19, 2025,
<https://www.energymatters.com.au/renewable-news/quantum-batteries-powerin-g-into-the-future/>
14. Superabsorption in an organic microcavity: Toward a quantum ..., fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8759743/>
 15. Ultrafast charging in a two-photon Dicke quantum battery | Request PDF - ResearchGate, fecha de acceso: julio 19, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/347413637_Ultrafast_charging_in_a_two-photon_Dicke_quantum_battery
 16. Unaintroducción a la Mecánica Cuántica Prof.Dr.Renato ..., fecha de acceso: julio 18, 2025, <https://renato.ryn-fismat.es/papers/cuantica.pdf>
 17. Mathematical formulation of quantum mechanics - Wikipedia, fecha de acceso: julio 18, 2025,
https://en.wikipedia.org/wiki/Mathematical_formulation_of_quantum_mechanics
 18. Mecánica cuántica y análisis funcional. - Adsú's blog, fecha de acceso: julio 18, 2025, <https://joenad.blogs.uv.es/2012/10/04/ideas-del-analisis-funcional/>
 19. SP-1311: ANÁLISIS FUNCIONAL - Kérwá - Universidad de Costa ..., fecha de acceso: julio 18, 2025,
<https://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstreams/46765966-278a-4a7a-a51e-76f749fda256/download>
 20. introducción al concepto de superposición en mecánica cuántica mediante los fundamentos de la computación - Universidad Pedagógica Nacional, fecha de acceso: julio 18, 2025,
<http://repository.pedagogica.edu.co/bitstream/handle/20.500.12209/19366/introduccion%20al%20concepto%20de%20superposicion.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
 21. Las matemáticas (para todos) detrás de la superposición cuántica ..., fecha de acceso: julio 18, 2025,
<https://www.muyinteresante.com/ciencia/matematicas-superposicion-cuantica-gato.html>
 22. ¿En qué consiste la computación cuántica? - AWS, fecha de acceso: julio 18, 2025,
<https://aws.amazon.com/es/what-is/quantum-computing/>
 23. Optimizing quantum battery performance by reducing battery influence in charging dynamics - arXiv, fecha de acceso: julio 19, 2025,
<https://arxiv.org/pdf/2505.08029>
 24. Más entrelazados que nunca - Bosoneando, fecha de acceso: julio 18, 2025,
<http://bosoneando.blogspot.com/2015/01/mas-entrelazados-que-nunca.html>
 25. Computación Cuántica Básica con Álgebra Lineal - Departamento de Matemáticas | Facultad de Ciencias UAM, fecha de acceso: julio 18, 2025,
http://matematicas.uam.es/~fernando.chamizo/supervision/TFG/past/memoirs/TFG_claudia_mielgo.pdf
 26. ¿Se pueden separar los estados entrelazados cuánticos en sus superposiciones con respecto al producto tensorial? - Academia EITCA, fecha de acceso: julio 18, 2025,
<https://es.eitca.org/informaci%C3%B3n-cu%C3%A1ntica/eitc-qi-qif-informaci%C3%B3n-cu%C3%A1ntica>

- [%B3n-cu%C3%A1ntica-fundamentos/entrelazamiento-cu%C3%A1ntico/enredo/%C2%BFSe-pueden-separar-los-estados-entrelazados-cu%C3%A1nticos-en-su-superposiciones-con-respecto-al-producto-tensorial%3F/](#)
27. ¿Cómo es que el hecho de que los elementos del espacio de producto tensorial con determinantes distintos de cero solo se puedan escribir como una combinación lineal de productos tensoriales es importante en el entrelazamiento? - Reddit, fecha de acceso: julio 18, 2025, https://www.reddit.com/r/AskPhysics/comments/1abp4hk/how_is_the_fact_that_elements_of_the_tensor/?tl=es-419
 28. Entanglement, coherence, and charging process of quantum batteries | Request PDF, fecha de acceso: julio 19, 2025, https://www.researchgate.net/publication/346762880_Entanglement_coherence_and_charging_process_of_quantum_batteries
 29. Ecuación de Schrödinger - Wikipedia, la enciclopedia libre, fecha de acceso: julio 18, 2025, https://es.wikipedia.org/wiki/Ecuaci%C3%B3n_de_Schr%C3%B6dinger
 30. 1.2: La ecuación de Schrödinger y sus componentes - LibreTexts ..., fecha de acceso: julio 18, 2025, [https://espanol.libretexts.org/Quimica/Qu%C3%ADmica_F%C3%ADsica_y_Te%C3%B3rica/Qu%C3%ADmica_Te%C3%B3rica_Avanzada_\(Simons\)/01%3A_Los_fundamentos_de_la_mec%C3%A1nica_cu%C3%A1ntica/1.02%3A_La_ecuaci%C3%B3n_de_Schr%C3%B6dinger_y_sus_componentes](https://espanol.libretexts.org/Quimica/Qu%C3%ADmica_F%C3%ADsica_y_Te%C3%B3rica/Qu%C3%ADmica_Te%C3%B3rica_Avanzada_(Simons)/01%3A_Los_fundamentos_de_la_mec%C3%A1nica_cu%C3%A1ntica/1.02%3A_La_ecuaci%C3%B3n_de_Schr%C3%B6dinger_y_sus_componentes)
 31. La Ecuación de Schrödinger: Una Clave de la Mecánica Cuántica - Astronoo, fecha de acceso: julio 18, 2025, <https://astronoo.com/es/articulos/ecuacion-de-schrodinger.html>
 32. Hamiltoniano (mecánica cuántica) - Wikipedia, la enciclopedia libre, fecha de acceso: julio 18, 2025, [https://es.wikipedia.org/wiki/Hamiltoniano_\(mec%C3%A1nica_cu%C3%A1ntica\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Hamiltoniano_(mec%C3%A1nica_cu%C3%A1ntica))
 33. ¿Cuáles son las principales diferencias entre la mecánica clásica y la mecánica cuántica? - Quora, fecha de acceso: julio 18, 2025, <https://es.quora.com/Cu%C3%A1les-son-las-principales-diferencias-entre-la-mec%C3%A1nica-cl%C3%A1sica-y-la-mec%C3%A1nica-cu%C3%A1ntica>
 34. Mecánica Clásica y Mecánica Cuántica - FÍSICA - Algunos Interrogantes y Diferencias 1º Parte - YouTube, fecha de acceso: julio 18, 2025, <https://www.youtube.com/watch?v=sRHalCJl1D4>
 35. Conceptos Matemáticos Básicos de Computación Cuántica - DocIRS, fecha de acceso: julio 18, 2025, https://www.docirs.cl/math_computacion_cuantica.asp
 36. Colloquium: Quantum batteries | Rev. Mod. Phys. - Physical Review Link Manager, fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.96.031001>
 37. Three-level Dicke quantum battery | Phys. Rev. B - Physical Review Link Manager, fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.109.235432>
 38. Entanglement-assisted charging of quantum batteries within optomechanical framework | Phys. Rev. E - Physical Review Link Manager, fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://link.aps.org/doi/10.1103/9vv8-s8r1>

39. Quantum Dicke battery supercharging in the bound-luminosity state - ResearchGate, fecha de acceso: julio 19, 2025, https://www.researchgate.net/publication/378108398_Quantum_Dicke_battery_supercharging_in_the_bound-luminosity_state
40. Exceeding the maximum classical energy density in fully charged quantum batteries - arXiv, fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://arxiv.org/html/2407.01832v2>
41. Exceeding the maximum classical energy density in fully charged quantum batteries - arXiv, fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://arxiv.org/html/2407.01832v1>
42. When charging quantum batteries, decoherence is a friend, not a foe ..., fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://physicsworld.com/a/when-charging-quantum-batteries-decoherence-is-a-friend-not-a-foe/>
43. A working quantum battery may be just around the corner - Advanced Science News, fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://www.advancedsciencenews.com/a-working-quantum-battery-may-be-just-around-the-corner/>
44. Quantum Dicke battery supercharging in the bound-luminosity state | Phys. Rev. A, fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.109.022210>
45. Dicke model - Wikipedia, fecha de acceso: julio 19, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Dicke_model
46. Quantum Dicke battery supercharging in the “bound luminosity” state - arXiv, fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://arxiv.org/html/2309.12433v2>
47. Quantum Dicke battery supercharging in the “bound luminosity” state - ResearchGate, fecha de acceso: julio 19, 2025, https://www.researchgate.net/profile/Seidali-Seidov/publication/378108398_Quantum_Dicke_battery_supercharging_in_the_bound-luminosity_state/links/65c727d179007454976c35b5/Quantum-Dicke-battery-supercharging-in-the-bound-luminosity-state.pdf
48. Quantum Advantage in the Charging Process of Sachdev-Ye-Kitaev Batteries | Request PDF, fecha de acceso: julio 19, 2025, https://www.researchgate.net/publication/347332604_Quantum_Advantage_in_the_Charging_Process_of_Sachdev-Ye-Kitaev_Batteries
49. Università Degli Studi di Padova Sachdev-Ye-Kitaev quantum batteries, fecha de acceso: julio 19, 2025, https://thesis.unipd.it/retrieve/5f11637a-eaba-48ef-ab17-7307575973a9/Sisorio_Giovanni.pdf
50. Quantum advantage in batteries for Sachdev-Ye-Kitaev interactions | Phys. Rev. A, fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.110.062209>
51. On the Quantum Advantage of SYK - ICTP – SAIFR, fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://www.ictp-saifr.org/wp-content/uploads/2021/07/Jeff-compactado.pdf>

52. Extending the Self-Discharge Time of Dicke Quantum Batteries Using Molecular Triplets | PRX Energy - Physical Review Link Manager, fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://link.aps.org/doi/10.1103/bhyh-53np>
53. Dicke-Ising quantum battery of an ion chain driven by a mechanical oscillator - arXiv, fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://arxiv.org/html/2502.08065v2>
54. [2503.23610] Quantum Computation with Quantum Batteries - arXiv, fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://arxiv.org/abs/2503.23610>