

Baterías Cuánticas: Un Análisis Estratégico de la Próxima Frontera en Almacenamiento de Energía

Resumen Ejecutivo

Este informe presenta un análisis exhaustivo y estratégico de las baterías cuánticas (QB), una clase emergente de dispositivos de almacenamiento de energía que aprovechan los principios de la mecánica cuántica para lograr un rendimiento teóricamente superior al de las tecnologías convencionales. El propósito de este documento es proporcionar a inversores tecnológicos, estrategias corporativas y responsables de la formulación de políticas una evaluación rigurosa del estado actual de esta tecnología, sus fundamentos científicos, los desafíos críticos para su viabilidad y su potencial de mercado a largo plazo.

El principal atractivo de las baterías cuánticas reside en el fenómeno de la "supercarga", una propiedad teórica mediante la cual la potencia de carga escala de forma no lineal con el tamaño de la batería. Esto implica que, a diferencia de las baterías clásicas, los sistemas cuánticos más grandes podrían cargarse exponencialmente más rápido. Este efecto se deriva de principios cuánticos como la superposición y el entrelazamiento, que permiten que las unidades de almacenamiento de energía (por ejemplo, moléculas o átomos) actúen de forma colectiva y coherente, acelerando drásticamente la absorción de energía.

Actualmente, la tecnología se encuentra en una fase incipiente de prueba de concepto (Nivel de Madurez Tecnológica 2-3). La investigación se divide en dos vertientes principales. La primera se centra en demostraciones a temperatura ambiente, utilizando plataformas como microcavidades orgánicas y sistemas de espines nucleares, que han logrado validar el principio de superabsorción con tiempos de carga de femtosegundos. La segunda vertiente explora sistemas criogénicos, como circuitos superconductores y puntos cuánticos, que ofrecen un mayor control y coherencia, pero a costa de condiciones operativas extremadamente restrictivas.

A pesar de estos avances prometedores, la comercialización de las baterías cuánticas se enfrenta a barreras formidables. La decoherencia —la pérdida de las propiedades cuánticas debido a la interacción con el entorno— sigue siendo el obstáculo más significativo, degradando rápidamente el rendimiento del dispositivo. Otros desafíos críticos incluyen la retención de energía a largo plazo (autodescarga), la escalabilidad de los sistemas cuánticos

coherentes y el desarrollo de una interfaz eficiente para extraer la energía almacenada y convertirla en corriente eléctrica utilizable.

El análisis estratégico concluye que las baterías cuánticas representan una inversión a largo plazo, de alto riesgo y alta recompensa. Se perfilan dos hojas de ruta de aplicación distintas y no excluyentes. Las baterías criogénicas están mejor posicionadas para servir a mercados de nicho dentro del propio ecosistema cuántico, actuando como fuentes de energía integradas para computadoras y sensores cuánticos. Por otro lado, las baterías a temperatura ambiente, si logran superar los desafíos de retención de energía, podrían tener un impacto disruptivo en aplicaciones convencionales como la mejora de la eficiencia de las células solares, la carga ultrarrápida para dispositivos del Internet de las Cosas (IoT) y, en un futuro más lejano, la electrónica de consumo y los vehículos eléctricos. Este informe recomienda un enfoque de "capital paciente" para la inversión, centrado en la investigación fundamental y diversificado entre las diferentes plataformas tecnológicas emergentes.

Sección 1: Introducción a la Revolución Cuántica en el Almacenamiento de Energía

1.1 El Imperativo de la Innovación en Baterías

El panorama energético global se encuentra en medio de una transformación sin precedentes, impulsada por la doble necesidad de descarbonizar la economía y satisfacer una demanda de energía en constante crecimiento. En este contexto, la tecnología de almacenamiento de energía se ha convertido en un pilar fundamental. Las baterías de iones de litio, la tecnología dominante en la actualidad, han sido un catalizador para la revolución de la electrónica portátil y el auge de los vehículos eléctricos. Sin embargo, a medida que la electrificación se expande a sectores más exigentes como el transporte pesado, la aviación y el almacenamiento a escala de red para estabilizar las fuentes de energía renovables intermitentes, las limitaciones inherentes de la química del ion-litio se hacen cada vez más evidentes. La industria se enfrenta a un imperativo de innovación para desarrollar soluciones de próxima generación que ofrezcan saltos cualitativos en densidad de energía, potencia de carga, vida útil, seguridad y sostenibilidad de los materiales. Es en esta búsqueda de un cambio de paradigma donde emergen conceptos disruptivos como las baterías cuánticas.

1.2 Contextualización de la Consulta: El Rol de los Líderes de la Industria y el Foco en las Baterías Cuánticas

La consulta inicial que motivó este informe mencionaba las "baterías de aluminio" y una supuesta implicación de Tesla. Sin embargo, un análisis riguroso del cuerpo de investigación disponible revela que el verdadero epicentro de la innovación radical en el almacenamiento de energía a nivel fundamental se encuentra en el campo de las **baterías cuánticas**. La referencia a las baterías de aluminio parece ser un error de formulación, y el interés subyacente apunta a tecnologías verdaderamente disruptivas.

El papel de líderes de la industria como Tesla es crucial en este contexto, no por una participación directa confirmada en la investigación de baterías cuánticas en la actualidad, sino como un indicador de la estrategia corporativa en el sector. La reciente adquisición por parte de Tesla de Wiferion, una empresa alemana especializada en carga inalámbrica inductiva para vehículos industriales, es un claro ejemplo de esta estrategia.¹ Este movimiento demuestra una disposición a internalizar tecnologías de vanguardia que optimizan el ecosistema del vehículo eléctrico, incluso si no están directamente relacionadas con la química de la celda de la batería. Esta acción estratégica establece un precedente relevante: los líderes del mercado están explorando activamente y adquiriendo tecnologías periféricas pero críticas para mantener su ventaja competitiva. Por lo tanto, aunque no haya evidencia pública de que Tesla esté investigando baterías cuánticas, su patrón de comportamiento sugiere que cualquier tecnología de almacenamiento de energía con un potencial disruptivo demostrado será un objetivo de interés estratégico en el futuro. Este informe, por lo tanto, se centrará en la tecnología de las baterías cuánticas como la frontera fundamental de la investigación en almacenamiento de energía.

1.3 Definición Fundamental de una Batería Cuántica (QB)

Una batería cuántica (QB) es un dispositivo de almacenamiento de energía que opera bajo los principios de la mecánica cuántica.⁵ A diferencia de las baterías electroquímicas convencionales, que almacenan energía en los enlaces químicos de la materia y la liberan a través del flujo de iones y electrones, una QB almacena energía en los estados cuánticos discretos de sus componentes constituyentes. Estos componentes pueden ser sistemas cuánticos individuales como átomos, moléculas, espines nucleares o fotones confinados en una cavidad óptica.⁶

La operación y el potencial de las QBs se basan en la explotación de fenómenos que no tienen análogo en el mundo clásico. Los dos principios más importantes son:

1. **Superposición:** Un sistema cuántico puede existir en una combinación lineal de múltiples estados simultáneamente. Por ejemplo, una molécula en una QB no está simplemente en su estado fundamental (descargada) o en un estado excitado (cargada), sino que puede estar en una superposición coherente de ambos. Matemáticamente, el estado $|\psi\rangle$ de una celda de batería cuántica (un qubit) se puede escribir como $|\psi\rangle = c_1|0\rangle + c_2|1\rangle$, donde $|0\rangle$ y

l1) son los estados base (descargado y cargado) y c_1, c_2 son amplitudes de probabilidad complejas.⁹

2. **Entrelazamiento:** Es una correlación cuántica no local entre dos o más sistemas. Cuando las celdas de una QB están entrelazadas, el estado de una celda no puede describirse independientemente de las demás, incluso si están separadas espacialmente. Este fenómeno permite que las celdas actúen como una única entidad colectiva, lo que es fundamental para lograr un rendimiento mejorado.¹⁰

El funcionamiento de una batería cuántica trasciende la simple manipulación de materia. Las baterías clásicas son, en esencia, dispositivos de "materia": su capacidad está directamente limitada por la cantidad de material activo (litio, cobalto, etc.) que pueden contener físicamente. Su comportamiento se rige por las leyes de la electroquímica y la termodinámica clásica. En contraste, las baterías cuánticas son fundamentalmente dispositivos de "información cuántica". Su estado se describe no por la cantidad de materia, sino por un vector de estado en un espacio de Hilbert, $|\psi\rangle$, la misma entidad matemática que describe un qubit en una computadora cuántica.¹² La carga y descarga de la batería corresponden a la evolución de este vector de estado, gobernada por operadores unitarios, que son las "puertas lógicas" de la computación cuántica.¹⁴

Esta profunda conexión implica que una batería cuántica puede ser conceptualizada como un procesador de información cuántica especializado en una tarea termodinámica: el almacenamiento y la extracción de energía. Esta perspectiva redefine radicalmente el campo de la investigación y el desarrollo de baterías. El camino hacia mejores baterías cuánticas no pasa necesariamente por el descubrimiento de nuevos materiales, como en la química de baterías tradicional, sino por el desarrollo de un control más preciso sobre los estados cuánticos y la ingeniería de las interacciones cuánticas. Los avances en algoritmos de control cuántico, corrección de errores cuánticos y la fabricación de qubits, todos campos impulsados por la computación cuántica, podrían tener un impacto directo y transferible en el diseño y la eficiencia de las baterías cuánticas.¹⁶

Sección 2: La Ventaja Cuántica: Supercarga, Superabsorción y Ergotropía

El atractivo principal de las baterías cuánticas no radica en una simple mejora incremental sobre las tecnologías existentes, sino en la promesa de un cambio cualitativo en el rendimiento, habilitado por un conjunto de fenómenos colectivos sin contraparte en la física clásica. Estos conceptos, conocidos como supercarga, superabsorción y ergotropía, definen la "ventaja cuántica" teórica en el almacenamiento de energía.

2.1 El Concepto de Supercarga (Supercharging)

La supercarga es el fenómeno más destacado y potencialmente disruptivo de las baterías cuánticas. Se refiere a la capacidad teórica de un sistema cuántico de muchas celdas para cargarse a una velocidad que escala de manera no lineal o "superextensiva" con el número de celdas.¹⁸

Para contextualizar, en un sistema clásico, si se tienen N baterías individuales y se cargan en paralelo, la potencia total del sistema es simplemente la suma de la potencia de cada batería. Por lo tanto, la potencia total, $P_{\text{clásica}}$, escala linealmente con el número de celdas: $P_{\text{clásica}} \propto N$. Esto significa que el tiempo de carga para el sistema completo es independiente de su tamaño.

En cambio, en una batería cuántica, las celdas pueden estar entrelazadas y actuar de forma colectiva. Los modelos teóricos predicen que, debido a estas correlaciones cuánticas, la potencia de carga, $P_{\text{cuántica}}$, puede escalar de forma superextensiva: $P_{\text{cuántica}} \propto N^\alpha$, donde el exponente α es mayor que 1. Algunos modelos teóricos sugieren un escalado cuadrático ($P \propto N^2$)²⁰, mientras que otros, como el modelo de Dicke, predicen un escalado de $P \propto N^{3/2}$.²¹

La implicación de este escalado es profunda y contraintuitiva: una batería cuántica más grande (con más celdas N) no solo almacena más energía, sino que también se carga más rápido en términos de potencia por celda.⁸ Este fenómeno podría, en teoría, reducir drásticamente los tiempos de carga para dispositivos de alta capacidad, abordando uno de los mayores obstáculos para la adopción masiva de vehículos eléctricos y otras tecnologías dependientes de baterías.

2.2 Superabsorción: El Mecanismo Físico Subyacente

El mecanismo físico que da origen a la supercarga es la **superabsorción**. Este fenómeno es el proceso inverso de la superradiancia, un efecto cuántico colectivo bien conocido en el que un conjunto de emisores (como átomos excitados) sincronizan su emisión de luz, liberando un pulso de radiación intenso y breve cuya intensidad escala con N^2 .

La superabsorción aplica un principio similar al proceso de carga. Describe una mejora colectiva en la tasa de absorción de energía (por ejemplo, de un campo de luz) por parte de un conjunto de N sistemas de dos niveles (TLS), como moléculas.¹⁹ Cuando estos TLS están en un estado de coherencia cuántica, pueden interactuar con el campo de luz incidente no como N absorbentes individuales, sino como una única entidad cuántica colectiva. Esta interacción colectiva aumenta la sección transversal de absorción del sistema, permitiéndole capturar energía del campo a una velocidad mucho mayor que la suma de las tasas de absorción individuales.²³ La primera demostración experimental de este efecto, utilizando moléculas orgánicas en una microcavidad, confirmó esta aceleración en la absorción de energía, sentando las bases experimentales para el concepto de supercarga.¹⁹

2.3 Ergotropía: La Métrica de la Energía Útil

En el análisis de las baterías cuánticas, es crucial distinguir entre la energía total almacenada y la energía que es realmente útil, es decir, que puede ser extraída como trabajo. Esta distinción es capturada por el concepto de **ergotropía**.⁵

La ergotropía, denotada como E , se define como la cantidad máxima de trabajo que se puede extraer de un sistema cuántico mediante operaciones unitarias cíclicas (es decir, procesos que devuelven el Hamiltoniano del sistema a su estado inicial). Un estado cuántico del cual no se puede extraer trabajo ($E=0$) se denomina "estado pasivo". Los estados térmicos, por ejemplo, son pasivos.²⁴

El entrelazamiento, si bien es el recurso clave para la carga rápida, introduce una complicación significativa en la extracción de energía. Durante el proceso de carga, se pueden generar fuertes correlaciones cuánticas no solo entre las celdas de la batería, sino también entre la batería y el cargador. Si estas correlaciones persisten, parte de la energía transferida a la batería puede quedar "bloqueada" en estos enlaces cuánticos. Esta **energía bloqueada** (locked energy) no es accesible a través de operaciones locales en la batería y, por lo tanto, no contribuye a la ergotropía, reduciendo la cantidad de trabajo útil que se puede extraer.²⁵

Este hecho revela una tensión fundamental en el diseño de baterías cuánticas. El mismo fenómeno que se busca maximizar para una carga rápida —el entrelazamiento— puede ser perjudicial para una descarga eficiente. El proceso de generar un entrelazamiento masivo para la supercarga²⁷ puede, si no se gestiona adecuadamente, llevar a una situación en la que una parte significativa de la energía almacenada quede atrapada e inutilizable.²⁵

Por lo tanto, el desafío central de la ingeniería de baterías cuánticas no es simplemente "crear más entrelazamiento". Más bien, se trata de un problema de control cuántico dinámico y altamente sofisticado. Un protocolo de batería cuántica ideal debe ser capaz de:

1. **Fase de Carga:** Generar rápidamente un alto grado de entrelazamiento entre las celdas de la batería para aprovechar la superabsorción y lograr una carga ultrarrápida.
2. **Fase de Descarga:** Desacoplar o reconfigurar activamente este entrelazamiento de una manera que "desbloquee" la energía almacenada, permitiendo que se extraiga con la máxima eficiencia en forma de trabajo (maximizando la ergotropía).

Esta necesidad de un control dinámico y preciso sobre los estados de muchos cuerpos subraya la sinergia entre el campo de las baterías cuánticas y el de la computación cuántica. Las técnicas y algoritmos desarrollados para manipular qubits en una computadora cuántica serán directamente aplicables a la gestión de los ciclos de carga y descarga en una batería cuántica avanzada.

Sección 3: Arquitecturas Teóricas y Modelos

Fundacionales

La investigación teórica sobre baterías cuánticas se ha centrado en varios modelos canónicos de la física de muchos cuerpos que permiten estudiar los efectos colectivos y el escalado de la potencia de carga. Dos de los modelos más influyentes son el modelo de Dicke y el modelo de Sachdev-Ye-Kitaev (SYK), cada uno de los cuales explora diferentes regímenes de la física cuántica.

3.1 El Modelo de Dicke: Coherencia Colectiva y Superradiancia

El modelo de Dicke es una de las piedras angulares de la óptica cuántica y describe la interacción colectiva entre un conjunto de N sistemas de dos niveles (TLS), como átomos o moléculas, y un único modo de un campo electromagnético confinado en una cavidad óptica.⁵ En el contexto de las baterías cuánticas, los TLS actúan como las celdas de la batería y la cavidad actúa como el cargador (o el canal de energía).

El Hamiltoniano del modelo de Dicke captura la energía de los TLS, la energía del campo de la cavidad y, lo más importante, el término de acoplamiento que permite el intercambio de energía entre ellos. Es este término de acoplamiento colectivo el que da lugar a fenómenos como la superradiancia (emisión coherente y acelerada) y la superabsorción (absorción coherente y acelerada). El protocolo de carga propuesto para una batería de Dicke consiste en "encender" el acoplamiento entre la cavidad y los TLS, permitir que la energía fluya de la cavidad a los TLS, y luego "apagar" el acoplamiento en el momento preciso en que la energía almacenada en los TLS es máxima, para evitar que la energía regrese a la cavidad.³¹

A pesar de su importancia como modelo fundamental, existe un debate en la literatura científica sobre si el modelo de Dicke estándar, cuando se analiza bajo restricciones termodinámicas rigurosas, proporciona una verdadera "ventaja cuántica" en la potencia de carga. Algunos estudios sugieren que el aparente escalado superextensivo podría ser un artefacto del modelo que no se mantendría en un sistema termodinámicamente consistente.⁵ No obstante, su simplicidad conceptual y su relevancia para sistemas físicos reales lo convierten en una plataforma teórica y experimental indispensable para el estudio de los efectos colectivos en el almacenamiento de energía.³²

3.2 El Modelo Sachdev-Ye-Kitaev (SYK): Caos Cuántico y Ventaja Robusta

El modelo Sachdev-Ye-Kitaev (SYK) es un modelo teóricamente soluble de N fermiones de

Majorana con interacciones aleatorias de muchos cuerpos (interacciones "todos con todos").²⁰ A diferencia de muchos sistemas de materia condensada que pueden describirse en términos de excitaciones de cuasipartículas, el modelo SYK describe un estado de la materia cuántica exótico y fuertemente correlacionado que carece de tales descripciones simples.

Este modelo ha atraído una inmensa atención en la física teórica por dos razones principales. Primero, es uno de los pocos modelos de sistemas fuertemente correlacionados que se pueden resolver analíticamente en el límite de un gran número de partículas ($N \rightarrow \infty$). Segundo, exhibe propiedades como el caos cuántico y un entrelazamiento que sigue una "ley de volumen" (el entrelazamiento crece con el tamaño del sistema), lo que lo convierte en un análogo holográfico de la física de los agujeros negros cuánticos en la teoría de cuerdas.²⁰

En el contexto de las baterías cuánticas, el modelo SYK es de suma importancia porque fue el primer modelo de muchos cuerpos en demostrar una robusta ventaja cuántica superextensiva en la potencia de carga que se origina en efectos genuinamente cuánticos y no en meros efectos colectivos clásicos.⁵ El caos y el entrelazamiento masivo inherentes al modelo SYK permiten una transferencia de energía extremadamente eficiente, lo que lleva a un escalado de potencia de carga que puede llegar a ser cuadrático ($P \propto N^2$).

La conexión de los modelos de QB con áreas tan dispares y fundamentales de la física teórica es un punto de gran importancia estratégica. El modelo de Dicke vincula el almacenamiento de energía con la óptica cuántica y la física atómica²⁹, mientras que el modelo SYK lo conecta con la materia condensada exótica y la física de altas energías.²⁰ Esto significa que la investigación en baterías cuánticas no es un campo aislado. Por el contrario, se ha convertido en una nueva plataforma experimental y teórica para explorar algunos de los problemas más profundos de la física moderna. Los avances en nuestra comprensión del caos cuántico o de la dualidad holográfica podrían traducirse directamente en nuevos y más eficientes diseños de baterías cuánticas. A la inversa, los experimentos con sistemas análogos a las baterías cuánticas podrían funcionar como simuladores cuánticos para poner a prueba estas teorías fundamentales. Esta sinergia eleva la relevancia del campo mucho más allá de su aplicación inmediata en el almacenamiento de energía.

3.3 Tabla Comparativa de Modelos Teóricos

Para proporcionar una visión clara y concisa de las principales arquitecturas teóricas, la siguiente tabla resume sus características clave.

Modelo	Sistema Físico	Principio Cuántico Dominante	Escalado de Potencia Teórico (P vs. N)	Ventaja Cuántica	Plataforma Experimental Principal	Complejidad/Desafíos

Dicke	N TLSs en una cavidad óptica	Coherencia colectiva (Superabsorción)	$\propto N^{3/2}$ ²²	Debatida / Condicional ⁵	Microcavidades orgánicas ¹⁹	Control preciso del acoplamiento luz-materia
SYK	N fermiones de Majorana	Caos cuántico, Entrelazamiento de muchos cuerpos	$\propto N^2$ ²⁰	Robusta ²⁰	Circuitos superconductores, átomos fríos (propuestos)	Realización de interacciones aleatorias de muchos cuerpos
Cadenas de espines	N espines en una red	Entrelazamiento de corto alcance	Varía (típicamente menos favorable que SYK)	Dependiente del modelo	Espines nucleares (RMN) ¹⁶	Limitaciones por interacciones locales

Sección 4: Evidencia Experimental y Actores Clave

Aunque la mayor parte de la investigación sobre baterías cuánticas sigue siendo teórica, en los últimos años han surgido varias demostraciones experimentales clave que han validado algunos de los principios fundamentales. Estas pruebas de concepto se pueden clasificar en dos grandes categorías: las que operan a temperatura ambiente y las que requieren condiciones criogénicas.

4.1 Baterías Cuánticas a Temperatura Ambiente

El desarrollo de baterías cuánticas que puedan operar en condiciones ambientales es el objetivo final para aplicaciones a gran escala, aunque presenta los mayores desafíos debido a la decoherencia térmica.

- **Microcavidades Orgánicas:** El avance más significativo en este ámbito fue la primera demostración experimental de superabsorción a temperatura ambiente.¹⁹ En estos experimentos, se utilizó una capa delgada de un semiconductor molecular orgánico, Lumogen-F Orange (LFO), colocada dentro de una microcavidad óptica. Al excitar el sistema con pulsos de láser ultracortos, los investigadores observaron que la velocidad de absorción de energía aumentaba con la concentración de moléculas, una firma clave del comportamiento colectivo.¹⁹ Se midieron tiempos de carga del orden de femtosegundos (10^{-15} s), confirmando el potencial para una carga ultrarrápida. Sin

embargo, el principal desafío de esta plataforma es la retención de energía. El mismo efecto colectivo que acelera la absorción (superabsorción) también acelera la emisión (superradiancia), lo que conduce a una autodescarga extremadamente rápida, limitando el tiempo de almacenamiento a escalas de tiempo muy cortas.³⁶

- **Espines Nucleares:** Otra plataforma prometedora a temperatura ambiente utiliza la Resonancia Magnética Nuclear (RMN). En un experimento notable, los investigadores utilizaron un sistema molecular con un espín nuclear central (la "batería") rodeado por un número variable de espines cargadores.¹⁶ Demostraron una ventaja en la potencia de carga que escalaba como N (donde N es el número de cargadores) y, lo que es más importante, lograron un tiempo de almacenamiento de energía de hasta 2 minutos en un sistema de 38 espines. Este resultado representa un avance crucial, ya que demuestra la posibilidad de un almacenamiento de energía significativamente más prolongado a temperatura ambiente en comparación con las microcavidades.¹⁶

4.2 Baterías Cuánticas Criogénicas

Operar a temperaturas extremadamente bajas (cerca del cero absoluto) reduce drásticamente la decoherencia, permitiendo un control más preciso sobre los estados cuánticos y la manifestación de efectos cuánticos más sutiles.

- **Circuitos Superconductores:** Se han fabricado prototipos de baterías cuánticas utilizando la misma tecnología que las computadoras cuánticas superconductoras. Un experimento utilizó un qutrit (un sistema cuántico de tres niveles) superconductor acoplado a una cavidad de microondas a una temperatura de 30 milikelvin (mK).¹⁶ Aunque este sistema era una unidad única y, por lo tanto, no podía demostrar la ventaja colectiva de la supercarga, representó un paso fundamental hacia la creación de dispositivos de energía cuántica altamente controlables e integrables.
- **Puntos Cuánticos:** Los puntos cuánticos, o "átomos artificiales", también se han utilizado para explorar los principios de las baterías cuánticas. Se han realizado experimentos que estudian el intercambio de energía entre un punto cuántico (actuando como cargador) y un reservorio de modo electromagnético (la batería) a temperaturas criogénicas de 5 a 20 Kelvin (K).¹⁶
- **Plataformas de Computación Cuántica:** La profunda conexión entre la información y la energía ha llevado a los investigadores a utilizar computadoras cuánticas comerciales como bancos de pruebas para los principios de las baterías cuánticas. En un experimento realizado en la plataforma IBM Q, se utilizó un qubit como una celda de batería cuántica. Se demostró una eficiencia de almacenamiento de energía superior al 95% en un tiempo de carga inferior a 135 nanosegundos. Un resultado particularmente interesante y contraintuitivo de este estudio fue que los errores en la preparación del estado inicial del

qubit, que son perjudiciales para la computación cuántica, en realidad mejoraron el rendimiento de la batería.¹⁶

4.3 Actores Clave y Ecosistema de Investigación

El campo de las baterías cuánticas está actualmente dominado por la investigación académica y los laboratorios financiados con fondos públicos. No existen todavía empresas comerciales con productos en el mercado. Algunos de los centros de investigación y colaboraciones más destacados que han surgido de los materiales analizados incluyen:

- El **Instituto Italiano de Tecnología** en Génova, que ha contribuido con modelos teóricos fundamentales.⁸
- La **Universidad de Adelaide** en Australia, cuyo equipo lideró la primera demostración experimental de superabsorción.²³
- Colaboraciones internacionales que involucran a instituciones en **India** (IIT Gandhinagar) y **China** (Universidad de Zhejiang, Academia China de Ingeniería Física), que están explorando aspectos teóricos como el uso de la decoherencia controlada.¹¹
- Grupos de investigación en el **Reino Unido** y **Corea del Sur** que también están activos en el campo, como se evidencia en las afiliaciones de los autores de los artículos científicos clave.

El análisis de las plataformas experimentales revela una divergencia fundamental en la dirección de la investigación, lo que sugiere una hoja de ruta de aplicación bifurcada para la tecnología de baterías cuánticas.¹⁶ No se trata de una sola tecnología compitiendo por un único mercado, sino de dos trayectorias distintas que evolucionan en paralelo hacia ecosistemas de aplicación muy diferentes.

Hoja de Ruta 1: Baterías Criogénicas para el Ecosistema Cuántico. Los sistemas de alta coherencia y baja temperatura, como los basados en circuitos superconductores, son extremadamente sensibles a la decoherencia. Esto hace que sea muy poco probable que puedan escalarse para alimentar dispositivos convencionales en el mundo macroscópico. En cambio, su mercado natural y más probable se encuentra **dentro del propio ecosistema cuántico**.¹⁶ Estas baterías podrían servir como fuentes de energía intrínsecas, coherentes y de bajo ruido para alimentar los componentes lógicos de las computadoras cuánticas, los sensores cuánticos de alta precisión o los nodos de las redes de comunicación cuántica. Al integrar la fuente de energía directamente en el chip cuántico, podrían resolver cuellos de botella críticos de escalabilidad relacionados con el calor y la densidad del cableado de control externo.

Hoja de Ruta 2: Baterías a Temperatura Ambiente para Aplicaciones Convencionales. Los sistemas más robustos pero menos "cuánticamente puros", como las microcavidades orgánicas y los espines nucleares, son los únicos candidatos viables para aplicaciones en el mundo clásico. Aunque su rendimiento cuántico se ve degradado por la decoherencia, su

capacidad para operar en condiciones normales abre la puerta a un conjunto de aplicaciones a más largo plazo. Las primeras aplicaciones podrían ser la mejora de la eficiencia de absorción en **células solares** o la alimentación de **dispositivos IoT** de muy bajo consumo. Si se logran avances monumentales en la retención de energía y la escalabilidad, el objetivo final sería la **electrónica de consumo** y, en el escenario más optimista y lejano, los **vehículos eléctricos**.⁸ Esta bifurcación es una visión estratégica esencial para cualquier inversor o estrategia. Evaluar el progreso en el campo de las baterías cuánticas requiere reconocer que el éxito en la vía criogénica (por ejemplo, una mayor coherencia) no se traduce necesariamente en un progreso hacia una batería para un coche, y viceversa. Son dos caminos tecnológicos con métricas de éxito, mercados objetivo y plazos de desarrollo fundamentalmente diferentes.

Sección 5: Barreras Críticas para la Comercialización

A pesar de los avances teóricos y las prometedoras pruebas de concepto, el camino desde los laboratorios actuales hasta un producto de batería cuántica comercialmente viable está plagado de desafíos fundamentales que se encuentran en la frontera de la física y la ingeniería. Superar estas barreras requerirá no solo mejoras incrementales, sino avances científicos y tecnológicos revolucionarios.

5.1 El Desafío Dominante de la Decoherencia

La decoherencia es el enemigo principal de casi todas las tecnologías cuánticas y representa el obstáculo más formidable para las baterías cuánticas.¹⁶ Se define como la pérdida de las propiedades cuánticas de un sistema —como la superposición y el entrelazamiento— debido a sus interacciones inevitables con el entorno. Estas interacciones, que pueden ser fluctuaciones térmicas, campos electromagnéticos parásitos o vibraciones, destruyen la delicada coherencia colectiva que es esencial para la supercarga.

La decoherencia se agrava drásticamente con el aumento de la temperatura. Por esta razón, las baterías cuánticas a temperatura ambiente son particularmente vulnerables.¹⁶ Para que los efectos cuánticos dominen, el espaciado de los niveles de energía en el sistema debe ser significativamente mayor que la energía de las fluctuaciones térmicas del entorno.

Sin embargo, una línea de investigación emergente y contraintuitiva sugiere que la decoherencia no es necesariamente un enemigo que deba ser eliminado por completo, sino que podría ser un parámetro de ingeniería que puede ser controlado y aprovechado. Estudios teóricos han demostrado que introducir una forma controlada de decoherencia, conocida como "dephasing" (desfase), puede en realidad acelerar el proceso de carga.¹¹ El mecanismo subyacente es que el desfase puede romper las oscilaciones coherentes de energía entre el cargador y la batería (un fenómeno análogo al efecto Zeno cuántico), que de otro modo

podrían atrapar el sistema y ralentizar la transferencia neta de energía. Al gestionar cuidadosamente la tasa de desfase, es posible encontrar un punto óptimo que acelere la carga sin degradar excesivamente el estado cuántico, mejorando tanto la velocidad como la estabilidad.

Esta perspectiva transforma el problema. En lugar de buscar un aislamiento cuántico perfecto, que es prácticamente imposible, el objetivo se convierte en la "ingeniería de reservorios" o el "control cuántico de sistemas abiertos". La idea es diseñar el entorno de la batería de tal manera que sus interacciones con el sistema sean beneficiosas, por ejemplo, facilitando la transferencia de energía a estados de almacenamiento estables mientras se suprime la descarga no deseada. Este cambio de paradigma de la eliminación del ruido al control del ruido podría ser una de las claves para hacer que las baterías cuánticas prácticas sean una realidad.

5.2 Retención de Energía y Autodescarga

Una vez que una batería cuántica se ha cargado, debe ser capaz de retener esa energía durante un período de tiempo útil. Este es otro desafío monumental. Los estados excitados en los sistemas cuánticos son inherentemente inestables y tienden a decaer a su estado fundamental a través de procesos como la emisión espontánea. En los sistemas colectivos como las baterías de Dicke, este proceso se acelera drásticamente a través de la superradiancia, lo que lleva a una autodescarga casi instantánea.³⁸

Para superar esto, los investigadores están explorando estrategias para transferir la energía absorbida rápidamente de los estados excitados de corta duración (utilizados para la carga rápida) a estados de almacenamiento metaestables de larga duración. Un enfoque prometedor es el uso de estados triplete moleculares, que tienen tiempos de vida mucho más largos que los estados singlete típicamente utilizados para la absorción de luz. Los experimentos ya han demostrado que este enfoque puede extender el tiempo de almacenamiento en varios órdenes de magnitud, aunque todavía se encuentra en escalas de tiempo de microsegundos a segundos, lejos de lo requerido para aplicaciones prácticas.³⁶

5.3 Escalabilidad y Fabricación

La promesa de la supercarga depende de la capacidad de construir sistemas con un gran número de celdas cuánticas (N) que mantengan la coherencia colectiva. Escalar los sistemas cuánticos es un desafío notorio en todo el campo. Los primeros modelos teóricos que requerían un entrelazamiento global entre todas las celdas son extremadamente difíciles de implementar en la práctica.¹⁶

Modelos como el de Dicke, que solo requieren un acoplamiento colectivo a un modo de cavidad común, son más factibles. Sin embargo, fabricar microcavidades a gran escala con un control

preciso sobre el número y la posición de las moléculas, y mantener la coherencia en todo el conjunto, sigue siendo un desafío de fabricación formidable.³⁸ Para los modelos tipo SYK, el desafío es aún mayor, ya que requieren la ingeniería de interacciones aleatorias de muchos cuerpos, algo que actualmente sólo es concebible en plataformas de simulación cuántica altamente especializadas.

5.4 La Interfaz Cuántico-Clásica

Finalmente, incluso si una batería cuántica puede ser cargada rápidamente y puede almacenar energía de manera estable, debe existir un mecanismo para extraer esa energía y entregarla como una corriente eléctrica utilizable para alimentar un dispositivo clásico. Este es el problema de la interfaz cuántico-clásica.⁸

La energía en una QB se almacena como excitaciones moleculares o atómicas. Para convertir esto en electricidad, se necesitarían capas conductoras o mecanismos de transferencia de carga que puedan extraer eficientemente los electrones de estos estados excitados sin destruir la coherencia del resto de la batería. El diseño de esta interfaz es un problema complejo de física e ingeniería de materiales que aún no se ha abordado de manera exhaustiva en los experimentos actuales, que se centran principalmente en demostrar los principios de carga y almacenamiento. El desarrollo de un mecanismo de descarga eficiente es tan crítico como el de la carga rápida para la viabilidad de la tecnología.

Sección 6: Análisis Estratégico y Hoja de Ruta Futura

La evaluación del potencial de las baterías cuánticas requiere una perspectiva equilibrada que reconozca tanto su promesa disruptiva a largo plazo como las formidables barreras científicas y de ingeniería que se interponen en el camino de su comercialización. Este análisis final sitúa la tecnología en un marco de madurez, explora el panorama competitivo y ofrece recomendaciones estratégicas para los actores interesados.

6.1 Nivel de Madurez Tecnológica (TRL) y Proyecciones

Actualmente, la tecnología de baterías cuánticas se encuentra en un Nivel de Madurez Tecnológica (TRL) bajo, estimado entre TRL 2 (formulación del concepto tecnológico) y TRL 3 (prueba de concepto experimental).⁵ Los principios fundamentales han sido validados en entornos de laboratorio controlados, pero la tecnología está lejos de ser un prototipo funcional en un entorno operativo.

Una posible hoja de ruta para su desarrollo se puede proyectar en tres horizontes temporales:

- **Corto Plazo (1-5 años):** El enfoque principal seguirá siendo la investigación fundamental. Los objetivos clave incluirán la optimización de los prototipos de laboratorio existentes, la demostración de un ciclo completo de carga-almacenamiento-descarga con una eficiencia de ergotropía mejorada en plataformas criogénicas, y un esfuerzo concertado para extender el tiempo de almacenamiento en los sistemas a temperatura ambiente desde los microsegundos actuales hasta el rango de los segundos.
- **Mediano Plazo (5-15 años):** Si se logran los hitos a corto plazo, podríamos ver las primeras aplicaciones de nicho. Las baterías cuánticas criogénicas podrían empezar a integrarse como componentes especializados dentro de las computadoras cuánticas para mejorar su escalabilidad y eficiencia energética. Simultáneamente, los prototipos de baterías a temperatura ambiente podrían encontrar uso en la alimentación de sensores cuánticos o dispositivos del Internet de las Cosas (IoT) de ultra bajo consumo que requieran ráfagas de energía rápidas.
- **Largo Plazo (15+ años):** La aplicación de las baterías cuánticas en mercados de gran consumo es un objetivo altamente especulativo que depende de avances científicos revolucionarios. En un escenario optimista, si se resuelven los problemas fundamentales de retención de energía, escalabilidad y la interfaz cuántico-clásica, la tecnología podría explorarse para mejorar la eficiencia de absorción de las células solares. La visión más ambiciosa, la carga ultrarrápida para la electrónica de consumo y los vehículos eléctricos, sigue siendo un objetivo muy lejano y requeriría avances que actualmente no son previsibles.

6.2 Panorama Competitivo y de Inversión

El panorama actual de las baterías cuánticas es predominantemente académico. El campo está impulsado por grupos de investigación universitarios y laboratorios nacionales, financiados en gran medida por subvenciones públicas para la ciencia fundamental. La inversión de capital de riesgo privado es prácticamente inexistente en esta etapa, dado el altísimo riesgo tecnológico y el horizonte temporal extremadamente largo para la comercialización.

Es crucial entender que la competencia para las baterías cuánticas no proviene solo de otros diseños de QBs, sino, y más importante, de las tecnologías de baterías clásicas avanzadas. Tecnologías como las baterías de estado sólido, las de litio-azufre o las de iones de sodio están mucho más avanzadas en la escala TRL (TRL 5-7) y cuentan con décadas de investigación y miles de millones de dólares de inversión. Para que las baterías cuánticas sean competitivas, no será suficiente con igualar el rendimiento de estas tecnologías; tendrán que ofrecer una ventaja de rendimiento de varios órdenes de magnitud para justificar el inmenso coste y riesgo de su desarrollo.

6.3 Recomendaciones Estratégicas

Dada la naturaleza incipiente y de alto riesgo de la tecnología, las estrategias de participación deben ser cuidadosamente calibradas.

- **Para Inversores (Capital de Riesgo, Oficinas Familiares):** Las baterías cuánticas deben ser tratadas como una inversión de "capital paciente" en investigación fundamental, similar a las primeras inversiones en computación cuántica o fusión nuclear. El enfoque no debe estar en los ingresos a corto plazo, sino en la creación de propiedad intelectual fundamental. Las inversiones deben dirigirse a equipos multidisciplinarios que combinen una profunda experiencia en física cuántica teórica con capacidades demostradas en ciencia de materiales y fabricación experimental. Es prudente diversificar las inversiones entre las dos hojas de ruta identificadas: las plataformas criogénicas para el mercado cuántico de nicho y las plataformas a temperatura ambiente para el potencial mercado convencional a largo plazo.
- **Para la Industria (Sectores Automotriz, Energético, Electrónico):** La estrategia más sensata en esta etapa es el monitoreo activo y la participación a través de colaboraciones estratégicas. Esto puede tomar la forma de financiar investigaciones en universidades líderes, unirse a consorcios industriales-académicos o establecer pequeños equipos de exploración internos. El objetivo no es desarrollar un producto a corto plazo, sino construir una base de conocimiento, identificar talento clave y asegurar el acceso temprano o la opción de licenciar propiedad intelectual en áreas críticas como los materiales para la superabsorción a temperatura ambiente o los algoritmos de control para la optimización de la ergotropía.

6.4 Conclusión Final

Las baterías cuánticas prometen revolucionar el almacenamiento y la transferencia de energía con su capacidad de carga casi instantánea, la cual se acelera a medida que aumenta el tamaño del dispositivo. Esta idea, que desafía la intuición clásica, impulsa una intensa investigación teórica y experimental.

Sin embargo, la implementación de estas baterías enfrenta desafíos fundamentales que van más allá de la ingeniería. Problemas como la decoherencia, la retención de energía y la escalabilidad, arraigados en la naturaleza misma del mundo cuántico, requieren avances científicos sin precedentes en el control de la materia. El éxito de esta tecnología no está garantizado.

En última instancia, el desarrollo de baterías cuánticas es tanto una búsqueda tecnológica como una exploración de la física fundamental. Aunque su comercialización aún es lejana e incierta, el conocimiento que se adquiera sobre el control de sistemas cuánticos, la termodinámica de la información y la ingeniería de interacciones cuánticas enriquecerá

profundamente la ciencia y podría dar lugar a tecnologías inesperadas. La promesa de una batería que se carga en un instante es demasiado significativa para ser ignorada, haciendo de esta una frontera ineludible para la ciencia y la tecnología.

Obras citadas

1. Tesla Acquires Wiferion | Hertz Electric Vehicles, fecha de acceso: agosto 1, 2025, <https://www.hertz.com/us/en/blog/electric-vehicles/tesla-acquires-wiferion>
2. Tesla Acquires A Wireless Charging Startup - InsideEVs, fecha de acceso: agosto 1, 2025, <https://insideevs.com/news/680401/tesla-acquires-wiferion/>
3. Tesla Acquires Wireless Charging Firm Wiferion - CleanTechnica, fecha de acceso: agosto 1, 2025, <https://cleantechnica.com/2023/08/02/tesla-acquires-wireless-charging-firm-wiferion/>
4. Tesla completes acquisition of wireless charging company Wiferion - Future Farming, fecha de acceso: agosto 1, 2025, <https://www.futurefarming.com/tech-in-focus/tesla-completes-acquisition-of-wireless-charging-company-wiferion/>
5. en.wikipedia.org, fecha de acceso: julio 19, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_battery
6. Quantum Batteries: A Materials Science Perspective - PMC, fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12038544/>
7. 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>
8. 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/>
9. 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>
10. Quantum Battery Team - CSIRO Research, fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://research.csiro.au/quantumbattery/research/quantum-batteries/>
11. 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/>
12. Conceptos Matemáticos Básicos de Computación Cuántica - DocIRS, fecha de acceso: julio 18, 2025, https://www.docirs.cl/math_computacion_cuantica.asp
13. Conceptos Matemáticos Básicos de Computación Cuántica - Parte I (Versión 6) - YouTube, fecha de acceso: julio 18, 2025, <https://www.youtube.com/watch?v=DWI2qfYRA4U>
14. Fundamentos matemáticos de la Mecánica Cuántica, fecha de acceso: julio 18, 2025, http://matematicas.uam.es/~daniel.faraco/docencia/tfg/TFG_PintoSantamaria.pdf

- f
15. 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
 16. Quantum batteries – The future of energy storage? - arXiv, fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://arxiv.org/pdf/2310.13020>
 17. [2503.23610] Quantum Computation with Quantum Batteries - arXiv, fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://arxiv.org/abs/2503.23610>
 18. 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>
 19. Superabsorption in an organic microcavity: Toward a quantum ..., fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8759743/>
 20. 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>
 21. Quantum Dicke battery supercharging in the “bound luminosity” state - arXiv, fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://arxiv.org/html/2309.12433v2>
 22. 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
 23. Quantum batteries closer with superabsorption breakthrough - Cosmos Magazine, fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://cosmosmagazine.com/science/physics/quantum-batteries-breakthrough-superabsorption/>
 24. 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>
 25. 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>
 26. 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>
 27. 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

28. Quantum battery systems: Analyzing two-mode field charging, qubit interactions, and environmental influences - Thermal Science, fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://thermalscience.vinca.rs/2024/6/132>
29. Dicke model - Wikipedia, fecha de acceso: julio 19, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Dicke_model
30. Enhanced energy transfer in a Dicke quantum battery - Frontiers, fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://www.frontiersin.org/journals/physics/articles/10.3389/fphy.2022.1097564/full>
31. 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>
32. 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
33. 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
34. 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
35. 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>
36. 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>
37. 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/>
38. Quantum Batteries: Powering Into the Future? - Energy Matters, fecha de acceso: julio 19, 2025, <https://www.energymatters.com.au/renewable-news/quantum-batteries-powering-into-the-future/>