

Análisis de Tecnologías de Frontera en Almacenamiento de Energía: Baterías de Estado Sólido y Baterías Cuánticas

Resumen Ejecutivo e Introducción

El almacenamiento de energía se ha consolidado como un pilar fundamental para la transición energética global, la electrificación del transporte y el avance de la electrónica portátil. Si bien la tecnología de baterías de iones de litio (LIB) ha dominado el mercado durante décadas, sus limitaciones inherentes en densidad energética, seguridad y velocidad de carga impulsan la investigación hacia paradigmas tecnológicos disruptivos. Este informe presenta un análisis exhaustivo y comparativo de dos de las tecnologías de frontera más prometedoras: las baterías de estado sólido (SSB) y las baterías cuánticas (QB).

El propósito de este documento es ofrecer una visión profunda y matizada de estas dos trayectorias tecnológicas, abarcando desde sus fundamentos científicos y evolución histórica hasta el estado actual de su desarrollo, prototipos, desafíos de implementación y ecosistema industrial. Se establece una distinción fundamental desde el inicio: las baterías de estado sólido representan una evolución directa y una mejora sustancial de la tecnología electroquímica existente, buscando superar las limitaciones de las LIB mediante la sustitución del electrolito líquido por uno sólido. Por el contrario, las baterías cuánticas no son una evolución, sino una revolución conceptual que opera bajo los principios de la mecánica cuántica, proponiendo un mecanismo de almacenamiento y transferencia de energía completamente nuevo y no electroquímico.

Estas tecnologías no son competidoras directas para las mismas aplicaciones en el corto o mediano plazo; sus principios operativos, nivel de madurez y mercados objetivo son drásticamente diferentes. Las SSB están en la cúspide de la comercialización para vehículos eléctricos y electrónica de consumo, mientras que las QB se encuentran en una fase experimental temprana, con aplicaciones potenciales en el ámbito de las tecnologías cuánticas, como la computación y la sensorica. La siguiente tabla ofrece un marco comparativo de alto nivel para contextualizar estas tecnologías frente al estándar actual.

Tabla 1: Comparativa de Tecnologías de Almacenamiento de Energía

Métrica	Batería de Iones de Litio (Actual)	Batería de Estado Sólido (Proyectada)	Batería Cuántica (Teórica/Experimental)
Principio Operativo	Intercalación de iones en electrolito líquido	Intercalación de iones en electrolito sólido	Almacenamiento de energía en estados

			cuánticos
Densidad Energética	Moderada-Alta	Muy Alta	Muy Baja (actualmente)
Densidad de Potencia	Moderada-Alta	Muy Alta	Teóricamente Extrema (Carga Superextensiva)
Seguridad	Riesgo de fuga térmica	Muy Alta (no inflamable)	Alta (a nivel de dispositivo)
Vida Útil (Ciclos)	1,000 - 4,000	> 4,000 (proyectado)	No aplicable (depende de la coherencia)
Nivel de Madurez (TRL)	9 (Comercial)	4-6 (Prototipos/Piloto)	1-3 (Prueba de concepto)
Costo Proyectado	~\$100/kWh	~\$75-100/kWh (2028-2030)	No aplicable
Aplicación Principal	EVs, Electrónica, Red	EVs, Aeroespacial, Electrónica	Computación cuántica, Sensores cuánticos

Este informe se estructura en dos partes principales. La Parte I se adentra en el mundo de las baterías cuánticas, comenzando con una revisión rigurosa de los fundamentos de la mecánica cuántica necesarios para su comprensión. La Parte II se centra en las baterías de estado sólido, analizando los materiales, las arquitecturas y la intensa carrera industrial hacia su comercialización. Finalmente, se presentan conclusiones que sintetizan el estado del arte y las perspectivas futuras de cada tecnología en el panorama energético global.

Parte I: Baterías Cuánticas: Aprovechando los Principios Fundamentales de la Física

Sección 1: Fundamentos de la Mecánica Cuántica para el Almacenamiento de Energía

Para comprender el concepto radical de una batería cuántica, es indispensable primero establecer el marco teórico sobre el cual se construye: la mecánica cuántica. Esta sección introduce los postulados y fenómenos clave que distinguen el mundo cuántico del clásico y que son directamente relevantes para los mecanismos de almacenamiento y transferencia de energía a escala atómica.

1.1 Del Mundo Clásico al Cuántico: Un Cambio de Paradigma

La física clásica, gobernada por las leyes de Newton, describe un universo determinista. En este marco, los objetos macroscópicos siguen trayectorias bien definidas en el espacio y el

tiempo; conociendo la posición y el momento iniciales de un sistema, es posible predecir su estado futuro con certeza.¹ Este formalismo es una excelente aproximación para el mundo que experimentamos a diario, pero falla estrepitosamente al intentar describir el comportamiento de la materia a escalas atómicas y subatómicas.⁴

La mecánica cuántica surge a principios del siglo XX para explicar fenómenos como la radiación del cuerpo negro y el efecto fotoeléctrico, que eran inexplicables desde la perspectiva clásica.⁵ La transición conceptual es profunda: la certeza es reemplazada por la probabilidad. Las partículas ya no tienen posiciones y momentos definidos simultáneamente, sino que su estado se describe mediante una "función de onda", un objeto matemático que codifica la distribución de probabilidad de encontrar la partícula en diferentes lugares.⁸ La causalidad clásica se desmorona; eventos como la emisión de radiación por un átomo pueden ocurrir espontáneamente, sin una causa aparente.¹

La frontera entre ambos dominios está definida por la constante de Planck, h (o su forma reducida, $\hbar = h/2\pi$). Si las variables de acción o momento angular de un sistema son del orden de \hbar , su comportamiento es inherentemente cuántico. Si son mucho mayores, la mecánica clásica es una aproximación suficiente.⁷ Esto implica que la mecánica cuántica es la teoría más fundamental, y la clásica emerge de ella en el límite macroscópico.⁷ Esta distinción es crucial: una batería cuántica no funciona moviendo iones a través de un medio material en el sentido clásico, sino manipulando directamente los estados de energía probabilísticos de un sistema cuántico.

1.2 El Formalismo Matemático: La Arquitectura de la Realidad Cuántica

La mecánica cuántica se sustenta en un formalismo matemático abstracto pero riguroso, principalmente basado en el análisis funcional y el álgebra lineal.

Espacios de Hilbert

El estado de un sistema cuántico se representa como un vector en un espacio de Hilbert, H .⁵ A diferencia de los espacios vectoriales tridimensionales de la física clásica, un espacio de Hilbert es un espacio vectorial definido sobre el campo de los números complejos, que está dotado de un producto interno.¹⁴ Este producto interno permite calcular la "longitud" (norma) de un vector de estado y el "ángulo" entre dos estados (ortogonalidad), conceptos que son fundamentales para la interpretación probabilística de la teoría.¹²

Notación de Dirac (Bra-Ket)

Para manipular estos vectores de estado, se utiliza la elegante notación de P.A.M. Dirac.⁷ Un vector de estado se denota como un "ket",

$|\psi\rangle$. Cada ket tiene un vector dual asociado, llamado "bra", que se denota como $\langle\phi|$. La combinación de un bra y un ket, $\langle\phi|\psi\rangle$, forma un "bracket" y representa el producto interno entre los dos estados, cuyo resultado es un número complejo.⁷ La norma al cuadrado de un

estado,

$\langle\psi|\psi\rangle$, es un número real y positivo que, para estados físicos, se normaliza a la unidad, reflejando que la probabilidad total de encontrar la partícula en algún lugar es del 100%.⁵

Operadores y Observables

En la mecánica cuántica, toda cantidad física medible (un "observable"), como la energía, la posición o el momento, está representada por un operador lineal Hermitiano (o autoadjunto) que actúa sobre los vectores de estado en el espacio de Hilbert. Un operador \hat{A} es una "receta" matemática que transforma un ket en otro: $\hat{A}|\psi\rangle=|\phi\rangle$.

La conexión crucial con el mundo experimental es que los únicos resultados posibles de una medición de un observable son los valores propios (eigenvalues) de su operador correspondiente.⁸ La propiedad hermitiana de estos operadores garantiza que sus valores propios sean siempre números reales, lo cual es un requisito indispensable para que representen cantidades físicas medibles.¹⁴ Cuando se mide un observable y se obtiene un valor propio específico

λ_j , el estado del sistema "colapsa" instantáneamente al vector propio (eigenket) $|\psi_j\rangle$ asociado con ese valor propio.¹

La Ecuación de Schrödinger

La dinámica de un sistema cuántico, es decir, cómo evoluciona su estado en el tiempo, está gobernada por la ecuación de Schrödinger.⁵ En su forma general dependiente del tiempo, la ecuación es:

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}|\psi(t)\rangle=\hat{H}|\psi(t)\rangle$$

Donde:

- i es la unidad imaginaria.
- \hbar es la constante de Planck reducida.
- $|\psi(t)\rangle$ es el vector de estado del sistema en el tiempo t .
- \hat{H} es el operador Hamiltoniano, que representa la energía total del sistema (la suma de las energías cinética y potencial).²²

Para sistemas donde el Hamiltoniano no depende explícitamente del tiempo (sistemas conservativos), la ecuación se puede separar, dando lugar a la ecuación de Schrödinger independiente del tiempo ²²:

$$\hat{H}|\psi\rangle=E|\psi\rangle$$

Esta es una ecuación de valores propios para el operador de energía. Sus soluciones, los eigenkets $|\psi_n\rangle$, son los "estados estacionarios" del sistema, y los valores propios correspondientes, E_n , son los niveles de energía cuantizados y permitidos que el sistema puede poseer.⁶

1.3 Fenómenos Clave para Baterías Cuánticas

Ciertos fenómenos, sin análogo en el mundo clásico, son la base sobre la que se construyen los conceptos de las baterías cuánticas.

Superposición

El principio de superposición establece que si un sistema puede existir en un estado $|\psi_1\rangle$ y en un estado $|\psi_2\rangle$, también puede existir en cualquier combinación lineal (superposición) de ambos: $|\psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$, donde c_1 y c_2 son amplitudes de probabilidad complejas.⁷ Antes de una medición, el sistema no está en uno u otro estado, sino en todos los estados de la superposición simultáneamente.¹ El cuadrado del módulo de una amplitud, $|c_i|^2$, da la probabilidad de que, al medir, el sistema colapse al estado $|\psi_i\rangle$.¹⁹ Este principio es fundamental para las baterías cuánticas, ya que permite que la energía se almacene simultáneamente en una superposición de múltiples niveles de energía, un mecanismo radicalmente diferente al almacenamiento electroquímico.

Entrelazamiento

El entrelazamiento es una correlación cuántica única y no local.⁶ Cuando dos o más partículas están entrelazadas, sus destinos están intrínsecamente ligados, sin importar la distancia que las separe. El estado cuántico del sistema compuesto no puede describirse como una simple combinación de los estados individuales de sus partes; debe describirse como un único vector de estado en el espacio de Hilbert producto tensorial de los espacios individuales.¹¹ Medir una propiedad de una partícula entrelazada influye instantáneamente en el resultado de la medición de la otra. Este recurso, que Einstein denominó "acción fantasmal a distancia", se postula como un ingrediente clave para lograr la carga colectiva y acelerada en las baterías cuánticas.

Principio de Incertidumbre y Conmutadores

Descubierto por Werner Heisenberg, el principio de incertidumbre establece que es imposible conocer simultáneamente y con precisión arbitraria pares de propiedades conjugadas, como la posición (x) y el momento (p).⁵ Matemáticamente, se expresa como $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$. Este principio no es una limitación de los instrumentos de medida, sino una consecuencia fundamental de la naturaleza ondulatoria de las partículas.⁵ Se deriva directamente de la no conmutatividad de los operadores correspondientes. El conmutador de dos operadores, $[\hat{A}, \hat{B}] = \hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A}$, cuantifica la no conmutatividad. Si dos operadores no conmutan ($[\hat{A}, \hat{B}] \neq 0$), sus observables correspondientes no pueden tener valores definidos simultáneamente y están sujetos a una relación de incertidumbre.⁶ Esta estructura matemática es esencial para comprender la dinámica de la transferencia de energía y los límites fundamentales del almacenamiento en el régimen cuántico.

Sección 2: La Batería Cuántica: Concepto, Evolución y Principios Operativos

Basándose en los fundamentos de la mecánica cuántica, el concepto de batería cuántica redefine el almacenamiento de energía, alejándose de los procesos electroquímicos para adentrarse en la manipulación de estados cuánticos.

2.1 Definición y Evolución Histórica

Una batería cuántica se define como un dispositivo que aprovecha fenómenos cuánticos, como la superposición y el entrelazamiento, para almacenar y liberar energía. El objetivo es lograr un rendimiento superior al de las baterías convencionales, particularmente en términos de velocidad de carga y densidad de potencia.

El campo es relativamente joven. El concepto fue formalmente propuesto en 2013 por Robert Alicki y Mark Fannes, quienes en su trabajo teórico sugirieron que el entrelazamiento entre múltiples "células" cuánticas podría aumentar la cantidad de trabajo extraíble del sistema. Las primeras investigaciones no se centraron en aplicaciones tecnológicas inmediatas, sino en utilizar el modelo de "batería" como un campo de pruebas teórico para explorar la termodinámica en el régimen cuántico y entender cómo se mueve la energía en sistemas cuánticos complejos.⁴³

2.2 Principios de Carga y Descarga: Ergotropía

En la termodinámica clásica, la energía interna de un sistema define el trabajo máximo que se puede extraer. En el mundo cuántico, la situación es más sutil. La cantidad de energía útil que se puede extraer de una batería cuántica se cuantifica mediante un concepto llamado **ergotropía**.⁴⁴

La ergotropía, denotada como E , se define como la máxima cantidad de trabajo que puede extraerse de un estado cuántico ρ mediante operaciones unitarias cíclicas (procesos que devuelven el Hamiltoniano a su estado inicial).⁴⁶ Matemáticamente, se expresa como:

$$E(\rho) = \text{Tr}[\rho H] - \min_{U \in \mathcal{U}(d)} \text{Tr}[U \rho U^\dagger H]$$

donde $\text{Tr}[\rho H]$ es la energía media inicial del estado, y el segundo término es la energía mínima alcanzable a través de todas las posibles transformaciones unitarias U . Un estado del cual no se puede extraer trabajo ($E=0$) se denomina **estado pasivo**. Por lo tanto, el proceso de carga de una batería cuántica consiste en llevar el sistema de un estado de baja ergotropía a uno de alta ergotropía, mientras que la descarga es el proceso inverso de extracción de este trabajo almacenado.⁴⁹

2.3 La "Ventaja Cuántica": Superabsorción y Carga Superextensiva

La característica más disruptiva y prometedora de las baterías cuánticas es la denominada "ventaja cuántica" en la potencia de carga, un fenómeno conocido como **carga**

superextensiva. Para entenderlo, se debe comparar con el modelo clásico: si se tienen N baterías convencionales, la forma más rápida de cargarlas es en paralelo, y la potencia total de carga escala linealmente con el número de baterías, $P_{\text{clásico}} \propto N$.

En una batería cuántica compuesta por N unidades cuánticas (por ejemplo, átomos o moléculas, a menudo llamados "células"), si estas unidades pueden interactuar de forma colectiva y coherente, la potencia de carga puede escalar de forma superlineal, es decir, más rápido que N . Se han predicho teóricamente escalados de potencia de $P_{\text{cuántico}} \propto N^{3/2}$ o incluso $P_{\text{cuántico}} \propto N^2$.

Este comportamiento tiene una consecuencia sorprendente: el tiempo de carga ($t_{\text{carga}} = E/P$) puede disminuir a medida que aumenta el tamaño (y por tanto la capacidad, E) de la batería. Este es un efecto puramente cuántico, sin análogo clásico, y representa la principal motivación para la investigación en este campo.

El mecanismo físico subyacente a esta carga acelerada es a menudo la **superabsorción**. Este es el proceso inverso a la superradiancia, un fenómeno bien conocido en óptica cuántica. En la superabsorción, un conjunto de N emisores (las células de la batería) absorbe la radiación de forma coherente y colectiva, lo que resulta en una tasa de absorción que es proporcional a N , en lugar de ser la suma de N tasas de absorción individuales. Es esta absorción colectiva y acelerada de fotones la que permite la carga superextensiva.

Sección 3: Modelos Teóricos y Prototipos Experimentales

La investigación en baterías cuánticas ha progresado desde conceptos teóricos abstractos hacia modelos físicos más concretos y, recientemente, a las primeras demostraciones experimentales. Esta sección explora los modelos teóricos más influyentes y las plataformas experimentales donde se están probando estos conceptos.

3.1 El Modelo de Dicke: Superradiancia y Carga Colectiva

El modelo de Dicke es uno de los pilares de la óptica cuántica y fue el primer modelo propuesto para una batería cuántica en 2018. Describe un sistema compuesto por un conjunto de N sistemas de dos niveles (TLS, por sus siglas en inglés), como átomos o moléculas, que interactúan colectivamente con un único modo de un campo electromagnético confinado en una cavidad óptica (el "cargador"). El Hamiltoniano del modelo de Dicke captura esta interacción colectiva luz-materia.

El principio de carga se basa en el fenómeno de la **superabsorción**, que es el proceso inverso a la **superradiancia**. En la superradiancia, un conjunto de átomos excitados emite fotones de forma coherente y sincronizada, resultando en un pulso de luz intenso y breve. En la superabsorción, el conjunto de átomos en su estado fundamental absorbe energía del campo de la cavidad de manera colectiva, lo que permite una transferencia de energía mucho más rápida que si cada átomo absorbiera de forma independiente. El protocolo de carga consiste en activar el acoplamiento entre la cavidad y los TLS, permitir que la energía fluya hacia los TLS, y desactivar el acoplamiento en el momento en que la energía almacenada en los TLS es máxima.

La evolución del conocimiento en este modelo ilustra la naturaleza dinámica de la investigación de frontera. Los trabajos iniciales de 2018 sugerían una ventaja cuántica con una potencia de carga escalando como N^2 . Sin embargo, análisis teóricos posteriores en 2020 revelaron que el Hamiltoniano utilizado en esos primeros estudios no estaba bien definido en el límite de un gran número de células ($N \rightarrow \infty$), y que una formulación termodinámicamente consistente eliminaba esta ventaja de carga. No obstante, la investigación no se detuvo ahí. Estudios más recientes, utilizando variantes como el modelo de Dicke extendido o explorando regímenes dinámicos específicos como el estado de "luminosidad ligada", han recuperado la predicción de una carga superextensiva, aunque con un escalado de potencia diferente, típicamente como $N^{3/2}$. Este ir y venir demuestra que la existencia y la magnitud de la "ventaja cuántica" no son universales, sino que dependen críticamente de la formulación precisa del modelo y del régimen operativo, reflejando una maduración del campo hacia una comprensión más matizada.

3.2 El Modelo Sachdev-Ye-Kitaev (SYK): Caos Cuántico y Entrelazamiento Máximo

El modelo Sachdev-Ye-Kitaev (SYK) es un modelo de juguete teóricamente poderoso que ha ganado una enorme atención en la física de la materia condensada y la física de altas energías.⁵³ Describe un sistema de

N fermiones de Majorana con interacciones aleatorias de muchos cuerpos ("all-to-all"). Es notable por ser un modelo de materia cuántica fuertemente correlacionada que es exactamente soluble en el límite de N grande, y por sus profundas conexiones con la gravedad cuántica a través de la correspondencia AdS/CFT (dualidad holográfica), sirviendo como un modelo simple de un agujero negro cuántico.

En el contexto de las baterías cuánticas, el modelo SYK fue el primer sistema de muchos cuerpos en demostrar una robusta ventaja cuántica superextensiva en el proceso de carga. Se cree que las propiedades intrínsecas del modelo SYK, como ser "máximamente caótico" y generar un entrelazamiento de ley de volumen en todos sus estados propios, son las responsables de esta carga acelerada. La dinámica caótica permite al sistema explorar el vasto espacio de Hilbert de manera muy eficiente, encontrando "atajos" para pasar del estado descargado al cargado mucho más rápido que un sistema no caótico. La investigación actual se centra en cómo realizar experimentalmente la física del modelo SYK en plataformas de estado sólido, como puntos cuánticos o copos de grafeno en campos magnéticos fuertes, para poder tender un puente entre la teoría abstracta y los prototipos de laboratorio.⁵⁶

3.3 Plataformas de Realización Experimental

Aunque la mayor parte de la investigación en baterías cuánticas ha sido teórica, en los últimos años han surgido varias demostraciones experimentales de prueba de concepto.

- **Microcavidades Orgánicas:** La plataforma más exitosa hasta la fecha para demostrar los principios de la batería cuántica ha sido la de las microcavidades ópticas con moléculas orgánicas. En 2022, un estudio publicado en *Science Advances* reportó la primera demostración experimental de superabsorción a temperatura ambiente. El

dispositivo consistía en una fina capa de un semiconductor molecular (Lumogen-F Orange) colocada entre dos espejos dieléctricos. Al excitar la cavidad con pulsos de láser ultrarrápidos, los investigadores observaron que la velocidad de carga aumentaba con el número de moléculas, confirmando la carga superextensiva. Trabajos más recientes en 2025 han demostrado un ciclo completo de carga-almacenamiento-descarga en un dispositivo similar basado en ftalocianina de cobre (CuPc), que no solo se carga con luz sino que también genera una fotocorriente, funcionando como una batería completa.⁵⁹

- **Circuitos Superconductores:** Se han construido prototipos de baterías cuánticas utilizando circuitos superconductores a temperaturas criogénicas (alrededor de 30 mK).⁶¹ Un experimento utilizó un qutrit superconductor (un sistema cuántico de tres niveles) acoplado a una cavidad resonante. Aunque este prototipo era de una sola unidad y, por lo tanto, no podía demostrar una ventaja colectiva, representó un paso crucial hacia la construcción de dispositivos de almacenamiento de energía cuántica con un alto grado de control.⁶¹
- **Puntos Cuánticos y Espines Nucleares:** Otras plataformas experimentales incluyen los puntos cuánticos de InGaAs, donde se ha estudiado el intercambio de energía con un reservorio de modos electromagnéticos a temperaturas de 5-20 K.⁶¹ Además, se han utilizado sistemas de espines nucleares en moléculas mediante resonancia magnética nuclear (RMN) a temperatura ambiente. En un experimento notable, se demostró el almacenamiento de energía durante un máximo de 2 minutos en un sistema compuesto por 38 espines, un avance significativo para la estabilidad de las baterías cuánticas a temperatura ambiente.⁶¹
- **Computadoras Cuánticas como Baterías:** Aprovechando el profundo vínculo entre información y energía, se ha propuesto y demostrado que cualquier plataforma capaz de funcionar como una computadora cuántica puede, en principio, ser utilizada como una batería cuántica. Experimentos realizados en la plataforma de computación cuántica en la nube de IBM Q demostraron la carga de un qubit, logrando una eficiencia de almacenamiento superior al 95% en tiempos de carga ultrarrápidos, inferiores a 135 nanosegundos.⁶¹ Sorprendentemente, se observó que ciertos errores en la inicialización del estado, perjudiciales para la computación, podían de hecho mejorar el rendimiento de la batería.⁶¹

Sección 4: Análisis de Rendimiento, Desafíos y Aplicaciones Futuras

A pesar del emocionante potencial teórico y los recientes avances experimentales, las baterías cuánticas enfrentan obstáculos formidables en su camino hacia la viabilidad práctica. Su análisis requiere un balance entre las ventajas prometidas y los desafíos fundamentales que aún deben superarse.

4.1 Ventajas y Potencial

La ventaja más citada y transformadora de las baterías cuánticas es la **velocidad de carga superextensiva**. La posibilidad de que el tiempo de carga disminuya con el aumento de la capacidad de la batería es un cambio de paradigma que podría revolucionar aplicaciones donde la recarga rápida es crítica.

Además de la velocidad, las baterías cuánticas ofrecen el potencial de una **mayor eficiencia en la transferencia de energía**. Al operar a través de procesos unitarios y coherentes, podrían teóricamente evitar las pérdidas por disipación (como la resistencia interna y las reacciones secundarias) que son inherentes a los procesos electroquímicos de las baterías clásicas, acercándose a los límites termodinámicos de la eficiencia.

4.2 Desafíos Fundamentales

El camino hacia las baterías cuánticas funcionales está plagado de desafíos que surgen directamente de la fragilidad de los fenómenos cuánticos que buscan explotar.

- **Decoherencia:** Este es, con mucho, el obstáculo más significativo. La decoherencia es la pérdida de las propiedades cuánticas de un sistema (como la superposición y el entrelazamiento) debido a interacciones no deseadas con su entorno. El ruido térmico, las vibraciones y los campos electromagnéticos parásitos pueden destruir la coherencia necesaria para la carga colectiva, haciendo que la batería cuántica se comporte como un conjunto de baterías clásicas y pierda su ventaja.⁶¹ Mantener la coherencia es extremadamente difícil, especialmente a temperatura ambiente y en sistemas a gran escala.

Sin embargo, la comprensión de la decoherencia ha evolucionado. La investigación reciente ha revelado que, en ciertos contextos, la decoherencia puede no ser un enemigo, sino un recurso útil. El proceso de carga de una batería cuántica no siempre es un aumento monótono de energía; a menudo implica oscilaciones en las que la energía fluye de vuelta desde la batería al cargador. Una interacción excesiva con el entorno puede "congelar" estas oscilaciones a través del efecto Zeno cuántico, deteniendo la carga por completo. No obstante, se ha descubierto teóricamente que una cantidad controlada de un tipo específico de decoherencia, llamada **defase**, puede amortiguar estas oscilaciones de retorno sin detener el proceso. Esto resulta en una carga neta más rápida y estable. Este hallazgo transforma el desafío de "eliminar toda la decoherencia" al desafío de ingeniería más matizado de "diseñar y controlar la decoherencia" para optimizar el rendimiento de la batería.

- **Escalabilidad:** Aumentar el número de unidades cuánticas (N) para almacenar una cantidad significativa de energía es un desafío monumental. Los prototipos actuales operan con un número relativamente pequeño de átomos o moléculas.⁶¹ Escalar estos sistemas manteniendo la coherencia colectiva es exponencialmente difícil. Este problema es especialmente agudo para las plataformas que requieren temperaturas criogénicas, donde cada componente adicional aumenta la carga térmica y la complejidad del sistema.
- **Extracción de Energía:** Cargar una batería cuántica almacenando energía en sus estados excitados es solo la mitad del problema. El desarrollo de mecanismos eficientes

para extraer esta energía de manera controlada y en una forma útil (por ejemplo, como una corriente eléctrica estable en lugar de un pulso de fotones coherentes) es un campo de investigación activo y complejo.⁶³ El concepto de ergotropía proporciona el límite teórico, pero los protocolos prácticos de extracción, especialmente en presencia de decoherencia, aún no están bien establecidos.

4.3 Estado de Implementación y Hoja de Ruta

El campo de las baterías cuánticas se encuentra en una etapa muy temprana de desarrollo, correspondiente a un Nivel de Madurez Tecnológica (TRL) de 1 a 3, que abarca desde la investigación básica hasta la prueba de concepto experimental.⁴⁴ No existen baterías cuánticas comerciales, y las aplicaciones prácticas están, como mínimo, a una década de distancia.

El análisis de las plataformas experimentales actuales sugiere una bifurcación en la hoja de ruta de desarrollo, con dos trayectorias de aplicación distintas y no competitivas.

1. **Baterías Cuánticas a Temperatura Ambiente:** Basadas principalmente en plataformas como las microcavidades orgánicas, estas baterías son menos sensibles a la decoherencia térmica que sus contrapartes criogénicas.⁶¹ Su principal ventaja demostrada es la superabsorción de luz, lo que las posiciona naturalmente para aplicaciones relacionadas con la recolección de energía solar. La hoja de ruta a corto y mediano plazo para esta tecnología se centra en mejorar la eficiencia de las células fotovoltaicas y, potencialmente, en alimentar dispositivos de muy bajo consumo, como sensores en el Internet de las Cosas (IoT).
2. **Baterías Cuánticas Criogénicas:** Estas baterías, basadas en tecnologías como los circuitos superconductores, son extremadamente sensibles a la decoherencia y requieren temperaturas cercanas al cero absoluto para funcionar.⁶¹ Su escalabilidad para alimentar dispositivos convencionales es muy improbable. En cambio, su nicho de aplicación más plausible es dentro del propio ecosistema de la tecnología cuántica. Las computadoras cuánticas superconductoras, que ya operan en entornos criogénicos, enfrentan desafíos significativos de suministro de energía y disipación de calor en sus puertas lógicas. Las baterías cuánticas criogénicas podrían actuar como fuentes de energía locales, reversibles y coherentes, integradas directamente en el chip cuántico para alimentar las operaciones de los cúbits, resolviendo así un cuello de botella interno para la computación cuántica a gran escala.

En resumen, en lugar de una única carrera hacia una "batería cuántica universal", el campo parece estar evolucionando hacia soluciones especializadas para ecosistemas tecnológicos radicalmente diferentes.

Parte II: Baterías de Estado Sólido: La Próxima Generación de Almacenamiento Electroquímico

A diferencia de la naturaleza teórica y de frontera de las baterías cuánticas, las baterías de estado sólido (SSB) representan la evolución tangible y más inminente de la tecnología de almacenamiento de energía. Su desarrollo se basa en décadas de investigación en electroquímica y ciencia de materiales, con el objetivo de superar las limitaciones fundamentales de las baterías de iones de litio.

Sección 5: Fundamentos y Evolución de las Baterías de Estado Sólido

5.1 Principios Electroquímicos: La Revolución del Electrolito Sólido

El principio operativo fundamental de una batería de estado sólido es idéntico en concepto al de una batería de iones de litio convencional: la energía se almacena y libera mediante el movimiento de iones de litio entre un electrodo positivo (cátodo) y un electrodo negativo (ánodo). La innovación radical reside en el reemplazo del electrolito líquido orgánico, que es inflamable y propenso a la degradación, por un material sólido.⁶⁴

Esta arquitectura de estado sólido consta de tres componentes principales⁶⁵:

1. **Cátodo:** A menudo compuesto por materiales similares a los de las LIB, como óxidos metálicos en capas (NMC) o fosfato de hierro y litio (LFP).
2. **Ánodo:** Frecuentemente se utiliza litio metálico puro, que ofrece la mayor densidad de energía teórica posible, o materiales con alto contenido de silicio.
3. **Electrolito Sólido (SSE):** Este es el componente clave. Debe ser un excelente conductor de iones de litio pero un mal conductor de electrones (un aislante electrónico). Además de su función iónica, también actúa como un separador físico rígido entre el ánodo y el cátodo.⁶⁵

Esta sustitución del electrolito es la que confiere a las SSB sus ventajas potenciales en seguridad, densidad energética y vida útil.

5.2 Evolución Histórica: De Faraday a la Era de los Vehículos Eléctricos

La historia de los conductores iónicos sólidos es sorprendentemente larga. Los primeros electrolitos sólidos, como el sulfuro de plata y el fluoruro de plomo(II), fueron descubiertos por Michael Faraday entre 1831 y 1834.⁶⁹ Sin embargo, durante más de un siglo, estos materiales tuvieron una aplicación limitada debido a su baja conductividad iónica a temperatura ambiente.⁶⁹

El interés en la tecnología resurgió en la segunda mitad del siglo XX con el descubrimiento de conductores iónicos rápidos como la β -alúmina en la década de 1960 y los electrolitos poliméricos como el óxido de polietileno (PEO).⁶⁹ A pesar de estos avances, muchas de estas tecnologías requerían operar a temperaturas elevadas (60-80 °C) para alcanzar una conductividad útil, lo que limitaba su aplicación práctica.⁶⁶

El punto de inflexión para las SSB modernas llegó en 2011, cuando un equipo de investigadores liderado por Kamaya demostró que el electrolito de sulfuro cristalino, de

composición $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$ (LGPS), poseía una conductividad iónica a temperatura ambiente superior a la de los electrolitos líquidos convencionales.⁶⁹ Este descubrimiento fue un hito, ya que demostró que las barreras de rendimiento de los electrolitos sólidos podían superarse, y catalizó una oleada de investigación y desarrollo por parte de la industria automotriz, con empresas como Toyota y Volkswagen invirtiendo masivamente en la tecnología para la próxima generación de vehículos eléctricos.⁶⁹

5.3 Clasificación de Tecnologías de Electrolitos Sólidos

La elección del material del electrolito sólido es la decisión de diseño más crítica, ya que determina las propiedades de rendimiento, los desafíos de fabricación y la viabilidad comercial de la batería. Los SSE se pueden clasificar en tres familias principales: polímeros, óxidos y sulfuros. Cada una presenta un conjunto único de ventajas y desventajas, lo que refleja las complejas compensaciones en la ciencia de materiales.

Tabla 2: Análisis Comparativo de Electrolitos de Estado Sólido

Propiedad	Electrolitos Poliméricos (SPEs)	Electrolitos de Óxido	Electrolitos de Sulfuro
Ejemplos	PEO	LLZO, LATP	LGPS, Argyrodites
Conductividad Iónica	Baja a T ambiente	Moderada	Muy Alta (comparable a líquidos)
Estabilidad Química	Moderada	Alta	Baja (reactivo con aire/humedad)
Propiedades Mecánicas	Flexible, buen contacto	Rígido, frágil, mal contacto	Blando, deformable, buen contacto
Ventajas	Procesamiento fácil, bajo costo	Alta estabilidad, amplio voltaje	Alta conductividad, maquinabilidad
Desventajas	Baja conductividad, dendritas	Fragilidad, alta T de sinterización	Inestabilidad, genera H_2S tóxico

- **Electrolitos Poliméricos Sólidos (SPEs):** Compuestos por una matriz polimérica (como el PEO) en la que se disuelve una sal de litio. Su principal ventaja es su flexibilidad y facilidad de procesamiento, lo que permite un excelente contacto interfacial con los electrodos.⁷² Sin embargo, su principal inconveniente es su baja conductividad iónica a temperatura ambiente, lo que a menudo requiere calentar la batería para un funcionamiento óptimo.⁶⁶
- **Electrolitos de Óxido:** Típicamente materiales cerámicos como el granate $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ (LLZO). Su gran atractivo es su alta estabilidad química y térmica, y su amplio rango de voltaje electroquímico.⁷⁶ No obstante, son extremadamente rígidos y frágiles, lo que dificulta mantener un buen contacto en la interfaz con los electrodos durante los ciclos de carga y descarga. Además, su fabricación requiere altas temperaturas de sinterización ($>1000\text{ }^\circ\text{C}$), lo que aumenta los costos y la complejidad del proceso.⁷⁹
- **Electrolitos de Sulfuro:** Materiales como LGPS y los argyrodites ($\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Cl}$). Son los

más prometedores en términos de rendimiento debido a su conductividad iónica ultraalta, a menudo superando a los electrolitos líquidos a temperatura ambiente.⁸⁰ También son mecánicamente más blandos que los óxidos, lo que facilita un mejor contacto interfacial. Su principal desventaja es su inestabilidad química: reaccionan con la humedad del aire para producir gas de sulfuro de hidrógeno (H_2S), que es tóxico y corrosivo, lo que exige procesos de fabricación en ambientes estrictamente controlados (secos).⁸¹

Sección 6: Análisis Comparativo de Rendimiento y Arquitecturas

Las SSB prometen superar a las LIB en casi todas las métricas de rendimiento clave. Sin embargo, la transición de la teoría a la práctica ha revelado desafíos fundamentales, principalmente centrados en la compleja naturaleza de la interfaz sólido-sólido.

6.1 Ventajas Clave sobre las Baterías de Iones de Litio

- **Seguridad Mejorada:** La ventaja más citada y menos controvertida de las SSB es la seguridad. Al eliminar el electrolito líquido orgánico, que es volátil e inflamable, se reduce drásticamente el riesgo de fuga térmica, incendios y explosiones, un problema persistente en las LIB.⁷⁹ El electrolito sólido actúa como una barrera física robusta que puede prevenir cortocircuitos internos.
- **Mayor Densidad Energética:** El electrolito sólido, al ser mecánicamente más robusto, está diseñado para suprimir el crecimiento de dendritas de litio. Esto permite el uso de un ánodo de litio metálico puro, que tiene la mayor capacidad específica teórica (3860 mAh/g) y el potencial electroquímico más bajo.⁷⁹ La combinación de un ánodo de litio metálico con cátodos de alta capacidad puede llevar a densidades energéticas que superen los 500 Wh/kg, casi el doble que las LIB comerciales actuales.⁸⁶
- **Rendimiento Térmico Superior:** Las SSB pueden operar en un rango de temperaturas mucho más amplio. A diferencia de los electrolitos líquidos, que pueden congelarse a bajas temperaturas (reduciendo drásticamente la conductividad) o descomponerse a altas temperaturas, los electrolitos sólidos mantienen su integridad estructural y conductividad en condiciones más extremas.⁶⁴ Esto las hace ideales para aplicaciones exigentes como la automoción o la aeroespacial.⁸⁷
- **Vida Útil Más Larga y Carga Rápida:** La mayor estabilidad del electrolito sólido reduce las reacciones secundarias parásitas que degradan los electrodos con el tiempo, lo que se traduce en una vida útil de ciclo más larga, potencialmente superando los 4,000 ciclos.⁶⁵ Además, su estabilidad a altas temperaturas permite soportar corrientes de carga más altas sin riesgo de sobrecalentamiento, lo que posibilita una carga ultrarrápida (por ejemplo, del 0% al 80% en menos de 15 minutos).⁶⁶

6.2 Desafíos Críticos y Mecanismos de Degradación

El análisis de la literatura científica revela un consenso abrumador: el principal cuello de botella para la comercialización de las SSB no reside en las propiedades intrínsecas de los materiales a granel, sino en la dificultad de crear y mantener una **interfaz electrodo-electrolito** estable y de baja resistencia. Este nexo sólido-sólido es el origen de la mayoría de los desafíos técnicos.

La raíz del problema es que, a diferencia de un electrolito líquido que puede fluir y mantener un contacto íntimo con la superficie rugosa de un electrodo, una interfaz entre dos sólidos es inherentemente imperfecta. Pequeños vacíos, falta de conformidad y la rigidez de los materiales conducen a un contacto deficiente, lo que aumenta la impedancia interfacial y crea puntos calientes donde la densidad de corriente se concentra, acelerando la degradación.⁷⁹

- **Conductividad Iónica a Temperatura Ambiente:** Aunque los electrolitos de sulfuro han alcanzado una alta conductividad, muchos sistemas basados en óxidos y polímeros todavía luchan por lograr un transporte iónico eficiente a temperatura ambiente. Esto se debe a que los iones deben superar barreras de activación más altas para moverse a través de una red cristalina rígida en comparación con un solvente líquido.⁶⁵
- **Inestabilidad Interfacial (Química y Electroquímica):** Los electrolitos sólidos, especialmente los de sulfuro, tienen ventanas de estabilidad electroquímica estrechas. Esto significa que pueden reaccionar químicamente con los materiales de los electrodos, especialmente con cátodos de alto voltaje, formando una capa de inter-fase (interphase) con alta resistencia iónica.⁸³ Esta capa crece con cada ciclo, "estrangulando" el flujo de iones y provocando una rápida pérdida de capacidad.
- **Estrés Químico-Mecánico:** Este es quizás el desafío más complejo. Los materiales de los electrodos, como el litio metálico o el silicio, experimentan cambios de volumen significativos (hasta un 300% para el silicio) durante la inserción y extracción de litio.⁸³ En una batería líquida, el electrolito puede acomodar estas expansiones y contracciones. En una SSB, este "respirar" del electrodo genera un enorme estrés mecánico en la frágil interfaz sólido-sólido. Este estrés puede causar la formación de grietas en el electrolito, la delaminación (desprendimiento) del electrodo, y la pérdida de contacto iónico, lo que lleva a una "muerte" súbita de la celda.⁸³ Por lo tanto, la ingeniería de interfaces no es solo un problema químico, sino también un profundo desafío mecánico.

Sección 7: El Ecosistema Industrial y la Carrera hacia la Comercialización

El inmenso potencial de las baterías de estado sólido ha desencadenado una intensa carrera global entre startups especializadas, fabricantes de automóviles y gigantes de la electrónica. El objetivo es ser el primero en lograr una producción en masa viable y rentable.

7.1 Actores Clave en el Mercado

El panorama de las SSB está definido por una mezcla de empresas "pure-play" altamente especializadas y grandes corporaciones industriales que han invertido miles de millones en I+D. La siguiente tabla resume las estrategias y cronogramas de los actores más prominentes.

Tabla 3: Panorama de Actores Clave en Baterías de Estado Sólido

Empresa	Tecnología Clave	Socios Estratégicos	Cronograma de Comercialización Proyectado
QuantumScape	Separador cerámico, diseño sin ánodo	Volkswagen (PowerCo), Murata	2025: Entrega de prototipos B1 para pruebas en vehículos (2026)
Solid Power	Electrolito de sulfuro, compatible con manufactura Li-ion	BMW, Ford, SK On	2026: Puesta en marcha de línea piloto continua de electrolitos
Toyota	Electrolito de sulfuro	Panasonic	2026: Inicio de producción limitada; 2027-2028: Lanzamiento en vehículos; 2030: Producción en masa
Samsung SDI	Electrolito propio, diseño sin ánodo	Hyundai	2027: Inicio de producción en masa

- **QuantumScape (QS):** Una de las startups más visibles, respaldada por Volkswagen y Bill Gates. Su enfoque se centra en un separador cerámico propietario y un diseño "anode-less" (sin ánodo), donde el ánodo de litio metálico se forma in situ durante la primera carga. Esto simplifica la fabricación y maximiza la densidad energética.⁸⁶
- **Solid Power (SLDP):** Esta empresa se centra en electrolitos de sulfuro y sigue una estrategia pragmática de diseñar sus celdas para que sean compatibles con las líneas de fabricación de baterías de iones de litio existentes (procesos roll-to-roll). Esto podría reducir significativamente los costos de capital y acelerar la producción a gran escala. Cuenta con el respaldo de Ford y BMW.⁸⁶
- **Toyota:** Considerado un pionero en la investigación de SSB, con más de 1,000 patentes en este campo.¹⁰¹ Se enfoca en electrolitos de sulfuro y ha anunciado planes ambiciosos para lanzar vehículos (inicialmente híbridos) con SSB entre 2026 y 2028, con el objetivo de una producción en masa para 2030.³⁵
- **Samsung SDI:** El gigante surcoreano de la electrónica y las baterías está desarrollando su propia tecnología de SSB, también con un diseño sin ánodo, y ha establecido una línea de producción piloto. Su objetivo es iniciar la producción en masa para 2027, inicialmente para vehículos eléctricos de gama alta.³⁵

7.2 Hitos Tecnológicos y Hojas de Ruta (2025-2030)

La industria de las SSB está a punto de entrar en una fase crítica. El período 2025-2026 marcará la transición del laboratorio a las pruebas en el mundo real. Empresas como QuantumScape y Solid Power tienen como objetivo entregar sus prototipos de "muestra B" a los fabricantes de automóviles (OEMs) para su validación en vehículos de prueba.⁹⁰ Estos prototipos son celdas de tamaño completo que deben demostrar rendimiento y durabilidad en condiciones de conducción reales.

El éxito de estas pruebas será crucial para desbloquear las siguientes fases de inversión y la construcción de gigafábricas. La producción en masa a gran escala, liderada por actores industriales como Toyota y Samsung SDI, se proyecta para el período 2027-2030.³⁵ Se espera que los primeros vehículos comerciales con SSB lleguen al mercado en un número limitado alrededor de 2026-2028, probablemente en modelos de lujo o de edición especial.⁹¹

7.3 Análisis de Costos de Fabricación

Existe una aparente paradoja en las proyecciones de costos de las SSB. Por un lado, a largo plazo, las SSB tienen el potencial de ser más baratas que las LIB. Esto se debe a que un diseño de estado sólido puede simplificar la arquitectura del paquete de baterías al eliminar la necesidad de un sistema de gestión térmica complejo, así como separadores y otros componentes de seguridad, permitiendo un diseño más compacto y eficiente de "Cell-to-Pack" o "Cell-is-Pack".¹⁰⁷

Por otro lado, los costos de fabricación iniciales son sustancialmente más altos. La producción de LIB se beneficia de décadas de optimización y economías de escala masivas, utilizando procesos *roll-to-roll* de alta velocidad y bajo costo.¹⁰⁸ En contraste, la fabricación de SSB implica procesos más lentos, de menor rendimiento y más caros, como la sinterización a alta temperatura para los óxidos o la manipulación en atmósferas inertes para los sulfuros.⁷⁹ Además, los materiales precursores, como el litio metálico de alta pureza, son más caros que el grafito utilizado en las LIB.⁶¹

Esta dicotomía se resuelve al considerar la curva de aprendizaje tecnológico. Las SSB se encuentran en una etapa incipiente de esta curva. Las estimaciones para 2026 sitúan el costo de producción de las SSB entre 400 y 800 \$/kWh, de cuatro a ocho veces más que las LIB actuales (~100 \$/kWh).¹⁰⁷ La viabilidad comercial a gran escala dependerá de una rápida reducción de costos a través de la innovación en los procesos de fabricación y la escalabilidad. La mayoría de los analistas y empresas, como Nissan, proyectan que la paridad de costos con las LIB, en torno a los 75-100 \$/kWh, podría alcanzarse en el período 2028-2030.⁹¹

Sección 8: Implicaciones Estratégicas y Perspectivas a Futuro

La transición hacia las baterías de estado sólido tendrá profundas implicaciones no solo para

la industria automotriz y electrónica, sino también para las cadenas de suministro globales y la geopolítica de los recursos energéticos.

8.1 Impacto en la Cadena de Suministro y Geopolítica

La adopción de SSB modificará la demanda de minerales críticos. El uso generalizado de ánodos de litio metálico aumentará significativamente la demanda de litio de alta pureza, ejerciendo más presión sobre una cadena de suministro ya tensa.¹¹²

Al mismo tiempo, las SSB ofrecen la oportunidad de reducir la dependencia de otros materiales problemáticos. Si se combinan con cátodos como el LFP, podrían eliminar la necesidad de cobalto, cuya minería se concentra en la República Democrática del Congo y está asociada con problemas éticos y de inestabilidad.¹¹² De manera similar, al reemplazar los ánodos de grafito, las SSB podrían disminuir la dependencia de China, que actualmente domina más del 90% del procesamiento de grafito para baterías.¹¹³

Sin embargo, la concentración geográfica de los recursos clave seguirá siendo un riesgo estratégico. La minería de litio está dominada por Australia y Chile, mientras que China mantiene un control significativo sobre las etapas de refinado y procesamiento de casi todos los materiales para baterías.¹¹³ Por lo tanto, la transición a las SSB no elimina la necesidad de diversificar y asegurar las cadenas de suministro, sino que cambia el enfoque hacia diferentes materiales y etapas del proceso.

8.2 Estado Actual de Implementación y Proyecciones de Mercado

El consenso de la industria es que las SSB se introducirán de forma gradual. Los primeros mercados serán aplicaciones de alto valor donde el rendimiento superior (mayor seguridad, densidad energética) justifica un costo inicial más elevado. Esto incluye vehículos eléctricos de lujo, aplicaciones aeroespaciales y militares, y posiblemente dispositivos médicos implantables.⁵²

La adopción masiva en el mercado de vehículos eléctricos de consumo general está supeditada a que se alcance la paridad de costos con las tecnologías de iones de litio. Las proyecciones de mercado sugieren que esto ocurrirá hacia finales de la década de 2020. Para 2030, se estima que las SSB podrían representar una parte significativa del mercado total de baterías para vehículos eléctricos, y para 2035, podrían alcanzar una cuota de mercado considerable.⁵²

8.3 Conclusiones: El Rol de las SSB en la Transición Energética

Las baterías de estado sólido no son una solución inmediata a los desafíos del almacenamiento de energía, pero representan la evolución tecnológica más prometedora y tangible a mediano plazo. Tienen el potencial de abordar directamente las principales barreras que aún frenan la adopción masiva de vehículos eléctricos: la ansiedad por la autonomía, los largos tiempos de carga y las preocupaciones sobre la seguridad.

Su éxito no está garantizado y depende críticamente de la superación de dos obstáculos interrelacionados: la resolución de los complejos desafíos de ingeniería en la interfaz sólido-sólido y el desarrollo de procesos de fabricación escalables y rentables. La intensa competencia y la masiva inversión en I+D por parte de un amplio espectro de actores industriales sugieren un fuerte impulso hacia la resolución de estos problemas.

En última instancia, las baterías de estado sólido se perfilan como un componente clave en la próxima fase de la transición energética, habilitando una electrificación más profunda y eficiente del transporte y otras industrias. Su desarrollo y despliegue en la próxima década serán un indicador crucial del ritmo y el alcance de la descarbonización global.

Obras citadas

1. ¿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>
2. ¿Cómo se diferencia la mecánica cuántica de la mecánica clásica? | CK-12 Foundation, fecha de acceso: julio 18, 2025, <https://www.ck12.org/flexi/es/fisica/modelo-atómico-mecánico-cuántico/como-se-diferencia-la-mecánica-cuántica-de-la-mecánica-clásica/>
3. ¿Por qué en mecánica cuántica se prefiere trabajar con el formalismo hamiltoniano? ¿Acaso no es posible trabajar las fórmulas de la mecánica cuántica con el formalismo lagrangiano? - Quora, fecha de acceso: julio 18, 2025, <https://es.quora.com/Por-qu%C3%A9-en-mec%C3%A1nica-cu%C3%A1ntica-se-prefiere-trabajar-con-el-formalismo-hamiltoniano-Acaso-no-es-posible-trabajar-las-f%C3%B3rmulas-de-la-mec%C3%A1nica-cu%C3%A1ntica-con-el-formalismo-lagrangiano>
4. 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>
5. UnaintroducciónalaMecánicaCuántica Prof.Dr.Renato ..., fecha de acceso: julio 18, 2025, <https://renato.ryn-fismat.es/papers/cuantica.pdf>
6. Mecánica cuántica - Wikipedia, la enciclopedia libre, fecha de acceso: julio 18, 2025, https://es.wikipedia.org/wiki/Mec%C3%A1nica_cu%C3%A1ntica
7. Introducción al formalismo de la mecánica cuántica no relativista, fecha de acceso: julio 18, 2025, <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/84250/35.%20Introducci%C3%A3n%20al%20formalismo%20de%20la%20mec%C3%A1nica%20cu%C3%A1ntica%20no%20relativista.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
8. Matemáticas de la Mecánica Cuántica, cómo el álgebra Lineal te salva la vida (Guillermo Pérez) - YouTube, fecha de acceso: julio 18, 2025, <https://www.youtube.com/watch?v=KVRtPiq5fzU>
9. LOS MODELOS MATEMÁTICOS DE LA MECÁNICA CUÁNTICA - Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia, fecha de acceso: julio 18, 2025, https://fundacionorotava.org/media/web/publication_files/publication25_Act.IV-V

[_C006_txi_w.pdf](#)

10. La naturaleza de la mecánica cuántica y la clásica - ¿es una el resultado de la otra? ¿Es una una ilusión creada por la otra? : r/quantum - Reddit, fecha de acceso: julio 18, 2025,
https://www.reddit.com/r/quantum/comments/l43jyk/the_nature_of_quantum_and_classical_mechanics_is/?tl=es-es
11. Mathematical formulation of quantum mechanics - Wikipedia, fecha de acceso: julio 18, 2025,
https://en.wikipedia.org/wiki/Mathematical_formulation_of_quantum_mechanics
12. ÁLGEBRA LINEAL en la MECÁNICA CUÁNTICA ☢️ ¿Para que SIRVEN las MATEMÁTICAS? - YouTube, fecha de acceso: julio 18, 2025,
<https://m.youtube.com/watch?v=MXvegZPcNtE&t=0s>
13. Física Teórica 2: Clase 1a: Formalismo matemático de la Mecánica Cuántica - YouTube, fecha de acceso: julio 18, 2025,
<https://www.youtube.com/watch?v=8HOtkCD-ss0>
14. 2.2: Álgebra lineal - LibreTexts Español, fecha de acceso: julio 18, 2025,
[https://espanol.libretexts.org/Fisica/Mecanica_Cuantica/Mec%C3%A1nica_Cu%C3%A1ntica_\(Fowler\)/02%3A_Algunas_matem%C3%A1ticas_esenciales/2.02%3A_%C3%81lgebra_lineal](https://espanol.libretexts.org/Fisica/Mecanica_Cuantica/Mec%C3%A1nica_Cu%C3%A1ntica_(Fowler)/02%3A_Algunas_matem%C3%A1ticas_esenciales/2.02%3A_%C3%81lgebra_lineal)
15. Appendix A. Linear algebra basics, fecha de acceso: julio 18, 2025,
<https://users.physics.ox.ac.uk/~lvovsky/quantumbook/app-a.pdf>
16. Linear Algebra for Quantum Mechanics - Galileo, fecha de acceso: julio 18, 2025,
<https://galileo.phys.virginia.edu/classes/751.mf1i.fall02/751LinearAlgebra.htm>
17. Linear Algebra and Quantum Mechanics - Nicholas Rui, fecha de acceso: julio 18, 2025,
<https://nicholasrui.com/2018/05/14/linear-algebra-and-quantum-mechanics/>
18. Fundamentos matemáticos de la Mecánica Cuántica, fecha de acceso: julio 18, 2025,
http://matematicas.uam.es/~daniel.faraco/docencia/tfg/TFG_PintoSantamaria.pdf
19. La probabilidad de la mecánica cuántica: una introducción en ..., fecha de acceso: julio 18, 2025,
https://miscelaneamatematica.org/download/tbl_articulos.pdf2.bfc178dc8fc7b266.353430352e706466.pdf
20. Formalismo cuántico, fecha de acceso: julio 18, 2025,
https://zaquan.unizar.es/record/31702/files/TAZ-TFG-2015-1977_ANE.pdf
21. 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))
22. 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
23. 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>
24. es.khanacademy.org, fecha de acceso: julio 18, 2025,
<https://es.khanacademy.org/science/physics/quantum-physics/quantum-numbers>

[-and-orbitals/a/the-quantum-mechanical-model-of-the-atom#:~:text=La%20ecuaci%C3%B3n%20de%20Schr%C3%B6dinger%2C%20H,regi%C3%B3n%20dada%20dentro%20del%20%C3%A1tomo.](#)

25. Mecánica Cuántica I - FaMAF, fecha de acceso: julio 18, 2025, <https://www.famaf.unc.edu.ar/~gcas/cuantica1/clases-mc1.pdf>
26. 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)
27. Mecánica Hamiltoniana | La guía de Física, fecha de acceso: julio 18, 2025, <https://fisica.laguia2000.com/fisica-mecanica/mecanica-hamiltoniana>
28. Hamiltoniano (mecánica clásica) - Wikipedia, la enciclopedia libre, fecha de acceso: julio 18, 2025, [https://es.wikipedia.org/wiki/Hamiltoniano_\(mec%C3%A1nica_cl%C3%A1sica\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Hamiltoniano_(mec%C3%A1nica_cl%C3%A1sica))
29. Oscilador armónico cuántico: la energía vibracional en las moléculas, fecha de acceso: julio 18, 2025, http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2310-02652016000100007
30. Ecuación de Schrodinger - HyperPhysics, fecha de acceso: julio 18, 2025, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/quantum/schr.html>
31. 7.5 El oscilador armónico cuántico - Física universitaria volumen 3 | OpenStax, fecha de acceso: julio 18, 2025, <https://openstax.org/books/f%C3%ADsica-universitaria-volumen-3/pages/7-5-el-oscilador-armonico-cuantico>
32. 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>
33. 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>
34. ¿El formalismo de la mecánica cuántica sería tan solo eso: un formalismo matemático? - Quora, fecha de acceso: julio 18, 2025, <https://es.quora.com/El-formalismo-de-la-mec%C3%A1nica-cu%C3%A1ntica-ser%C3%ADa-tan-solo-eso-un-formalismo-matem%C3%A1tico>
35. Solid-state battery mass production still years away, scientist says - Car News China, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://carnewschina.com/2025/07/18/solid-state-battery-mass-production-still-years-away-scientist-says/>
36. ¿Qué es la Mecánica Cuántica? - YouTube, fecha de acceso: julio 18, 2025,

- <https://www.youtube.com/watch?v=tMi-jP4gaqo>
37. ¿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-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/>
 38. Más entrelazados que nunca - Bosoneando, fecha de acceso: julio 18, 2025,
<http://bosoneando.blogspot.com/2015/01/mas-entrelazados-que-nunca.html>
 39. 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
 40. 7.2 El principio de incertidumbre de Heisenberg - Física universitaria volumen 3 | OpenStax, fecha de acceso: julio 18, 2025,
<https://openstax.org/books/f%C3%ADsica-universitaria-volumen-3/pages/7-2-el-principio-de-incertidumbre-de-heisenberg>
 41. El principio de indeterminación - Física cuántica en la red, fecha de acceso: julio 18, 2025, <https://www.fisicacuantica.es/el-principio-de-indeterminacion/>
 42. espanol.libretexts.org, fecha de acceso: julio 18, 2025,
[https://espanol.libretexts.org/Fisica/Fisica_Nuclear_y_de_Partículas/Libro%3A_Introducci%C3%B3n_a_la_F%C3%ADsica_Nuclear_Aplicada_\(Cappellaro\)/02%3A_Introducci%C3%B3n_a_la_Mec%C3%A1nica_Cu%C3%A1ntica/2.05%3A_Operadores%2C_Conmutadores_y_Principio_de_Incertidumbre#:~:text=Significa%20que%20si%20trato%20de,se%20puede%20hacer%20m%C3%A1s%20precisa.](https://espanol.libretexts.org/Fisica/Fisica_Nuclear_y_de_Partículas/Libro%3A_Introducci%C3%B3n_a_la_F%C3%ADsica_Nuclear_Aplicada_(Cappellaro)/02%3A_Introducci%C3%B3n_a_la_Mec%C3%A1nica_Cu%C3%A1ntica/2.05%3A_Operadores%2C_Conmutadores_y_Principio_de_Incertidumbre#:~:text=Significa%20que%20si%20trato%20de,se%20puede%20hacer%20m%C3%A1s%20precisa.)
 43. The harsh reality of quantum batteries - Down To Earth, fecha de acceso: julio 20, 2025,
<https://www.downtoearth.org.in/science-technology/the-harsh-reality-of-quantum-batteries>
 44. Quantum battery - Wikipedia, fecha de acceso: julio 20, 2025,
https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_battery
 45. en.wikipedia.org, fecha de acceso: julio 20, 2025,
https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_battery#:~:text=The%20concept%20of%20quantum%20batteries,being%20been%20stored%20is%20possible.
 46. Daemonic ergotropy in continuously monitored open quantum batteries | Phys. Rev. Applied, fecha de acceso: julio 20, 2025,
<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevApplied.20.044073>
 47. Fluctuation in energy extraction from quantum batteries: How open should the system be to control it? - ResearchGate, fecha de acceso: julio 20, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/391990411_Fluctuation_in_energy_extraction_from_quantum_batteries_How_open_should_the_system_be_to_control_it
 48. Quantum work extraction efficiency for noisy quantum batteries: The role of coherence | Phys. Rev. A - Physical Review Link Manager, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.111.012204>

49. Quantumness speeds up quantum thermodynamics processes - PMC, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11059519/>
50. The Mind-Blowing Physics of Quantum Batteries - YouTube, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://www.youtube.com/watch?v=vRjrU5mP4Q8>
51. Noncompletely Positive Quantum Maps Enable Efficient Local Energy Extraction in Batteries, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.132.240401>
52. 7 Solid-State Battery Stocks to Watch in 2025 - Moneywise, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://moneywise.com/investing/stocks/solid-state-battery-stocks>
53. Quantum Advantage in the Charging Process of Sachdev-Ye-Kitaev Batteries | Request PDF, fecha de acceso: julio 20, 2025, https://www.researchgate.net/publication/347332604_Quantum_Advantage_in_the_Charging_Process_of_Sachdev-Ye-Kitaev_Batteries
54. Università Degli Studi di Padova Sachdev-Ye-Kitaev quantum batteries, fecha de acceso: julio 20, 2025, https://thesis.unipd.it/retrieve/5f11637a-eaba-48ef-ab17-7307575973a9/Sisorio_Giovanni.pdf
55. Thermoelectric power of Sachdev-Ye-Kitaev islands: Probing Bekenstein-Hawking entropy in quantum matter experiments - OSTI, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://www.osti.gov/servlets/purl/1803506>
56. Quantum advantage in batteries for Sachdev-Ye-Kitaev interactions | Phys. Rev. A, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.110.062209>
57. The SYK charging advantage as a random walk on graphs - arXiv, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://arxiv.org/html/2412.04560v1>
58. Quantum advantage in batteries for Sachdev-Ye-Kitaev interactions - arXiv, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://arxiv.org/html/2405.03306v9>
59. Experimental demonstration of a scalable room-temperature quantum battery, fecha de acceso: julio 20, 2025, https://www.researchgate.net/publication/388459151_Experimental_demonstration_of_a_scalable_room-temperature_quantum_battery
60. [2501.16541] Experimental demonstration of a scalable room-temperature quantum battery, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://arxiv.org/abs/2501.16541>
61. What are solid-state batteries, and how do they differ from current EV batteries?, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://www.batterypowertips.com/what-are-solid-state-batteries-and-how-do-they-differ-from-current-ev-batteries/>
62. Special Issue : Quantum Battery Applications - MDPI, fecha de acceso: julio 20, 2025, https://www.mdpi.com/journal/batteries/special_issues/quantum_battery_applications
63. Why Quantum Batteries Might Change Everything - YouTube, fecha de acceso: julio 20, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=_9gFfKGJIHU
64. Part 4: What are solid-state batteries? An expert explains the basics, how they differ from conventional batteries, and the possibility of practical application. |

- Murata Manufacturing Articles, fecha de acceso: julio 20, 2025,
<https://article.murata.com/en-global/article/basic-lithium-ion-battery-4>
65. Solid-state batteries: how they work, fecha de acceso: julio 20, 2025,
<https://www.flashbattery.tech/en/blog/how-solid-state-batteries-work/>
 66. Solid-State Batteries: The Technology of the 2030s but the Research Challenge of the 2020s - The Faraday Institution, fecha de acceso: julio 20, 2025,
https://faraday.ac.uk/wp-content/uploads/2020/04/Faraday-Insights-5_Updated.pdf
 67. Solid-State Battery Vs Traditional Batteries - Meegle, fecha de acceso: julio 20, 2025,
https://www.meegle.com/en_us/topics/solid-state-batteries/solid-state-battery-vs-traditional-batteries
 68. What are All-Solid-State Batteries - BioLogic Learning Center, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://www.biologic.net/topics/what-are-all-solid-state-batteries/>
 69. Solid-state battery - Wikipedia, fecha de acceso: julio 20, 2025,
https://en.wikipedia.org/wiki/Solid-state_battery
 70. en.wikipedia.org, fecha de acceso: julio 20, 2025,
https://en.wikipedia.org/wiki/Solid-state_battery#:~:text=Solid%2Dstate%20batteries%20theoretically%20offer,ion%20or%20lithium%20polymer%20batteries.&text=While%20solid%20electrolytes%20were%20first,several%20problems%20prev,ented%20widespread%20application.
 71. QuantumScape: Navigating The Road To Commercial Battery Production - Trefis, fecha de acceso: julio 20, 2025,
<https://www.trefis.com/investing/articles/568046/quantumscape-navigating-the-road-to-commercial-battery-production/2025-07-01>
 72. Solid polymer electrolytes: Ion conduction mechanisms and enhancement strategies, fecha de acceso: julio 20, 2025,
<https://www.sciopen.com/article/10.26599/NRE.2023.9120050?issn=2791-0091>
 73. Applications of Polymer Electrolytes in Lithium-Ion Batteries: A Review - MDPI, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/19/3907>
 74. Toward Sustainable Solid Polymer Electrolytes for Lithium-Ion Batteries | ACS Omega, fecha de acceso: julio 20, 2025,
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.2c01926>
 75. Recent Advances in Poly(ethylene oxide)-Based Solid-State Electrolytes for Lithium-Ion Batteries | The Journal of Physical Chemistry C - ACS Publications, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jpcc.4c05094>
 76. Review on solid electrolytes for all-solid-state lithium-ion batteries | Request PDF, fecha de acceso: julio 20, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/324644594_Review_on_solid_electrolytes_for_all-solid-state_lithium-ion_batteries
 77. Solid-State Li Ion Batteries with Oxide Solid Electrolytes: Progress and Perspective | Request PDF - ResearchGate, fecha de acceso: julio 20, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/366541746_Solid-state_Li_Ion_Batteries_with_Oxide_Solid_Electrolytes_Progress_and_Perspective
 78. Degradation Mechanism of All-Solid-State Li-Metal Batteries Studied by

- Electrochemical Impedance Spectroscopy - PMC, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9478940/>
79. Advancements and Challenges in Solid-State Battery Technology: An In-Depth Review of Solid Electrolytes and Anode Innovations - MDPI, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://www.mdpi.com/2313-0105/10/1/29>
 80. A Comprehensive Review of Sulfide Solid-State Electrolytes: Properties, Synthesis, Applications, and Challenges - MDPI, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://www.mdpi.com/2073-4352/15/6/492>
 81. Review of various sulfide electrolyte types for solid-state lithium-ion batteries, fecha de acceso: julio 20, 2025, https://www.researchgate.net/publication/361382334_Review_of_various_sulfide_electrolyte_types_for_solid-state_lithium-ion_batteries
 82. Review on Interface and Interphase Issues in Sulfide Solid-State Electrolytes for All-Solid-State Li-Metal Batteries - MDPI, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://www.mdpi.com/2673-3293/2/3/30>
 83. Characterizing Electrode Materials and Interfaces in Solid-State Batteries - ACS Publications, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemrev.4c00584>
 84. Solid-State Lithium Batteries: Advances, Challenges, and Future Perspectives - MDPI, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://www.mdpi.com/2313-0105/11/3/90>
 85. What are the main challenges in developing solid-state batteries for EVs?, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://www.batterypowertips.com/what-are-the-main-challenges-in-developing-solid-state-batteries-for-evs/>
 86. Top Solid State Battery Stocks for 2025: Ranked by Pure-Play Focus - Exoswan Insights, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://exoswan.com/solid-state-battery-stocks>
 87. Solid-state batteries charge faster, last longer | University of California, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://www.universityofcalifornia.edu/news/solid-state-batteries-charge-faster-last-longer>
 88. Lithium-Ion Batteries under Low-Temperature Environment: Challenges and Prospects, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9698970/>
 89. Is LFP Battery Performance Affected By Temperature? - Clean Energy Reviews Forum, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://forum.cleanenergyreviews.info/t/is-lfp-battery-performance-affected-by-temperature/2787>
 90. QuantumScape 2025: Latest News, Solid-State Battery Breakthroughs, Financials & Outlook (June 27th, 2025) - TS2 Space, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://ts2.tech/en/quantumscape-2025-latest-news-solid-state-battery-breakthroughs-financials-outlook/>
 91. How Solid-State Batteries Will Revolutionize EV Range in 2025 - MOTORWATT, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://motorwatt.com/ev-blog/trends/solid-state-batteries-will-revolutionize-ev->

[range-in-2025](#)

92. Interfaces in Solid-State Batteries: Challenges and Design Strategies - ResearchGate, fecha de acceso: julio 20, 2025, https://www.researchgate.net/publication/365009006_Interfaces_in_Solid-State_Batteries_Challenges_and_Design_Strategies
93. Interfaces Between Cathode and Electrolyte in Solid State Lithium Batteries: Challenges and Perspectives - Frontiers, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://www.frontiersin.org/journals/chemistry/articles/10.3389/fchem.2018.00616/full>
94. Review on interface issues of Li-argyrodite-based solid-state Li-metal batteries, fecha de acceso: julio 20, 2025, https://www.researchgate.net/publication/392391882_Review_on_interface_issues_of_Li-argyrodite-based_solid-state_Li-metal_batteries
95. Solid-State Lithium-Ion Batteries: Advantages, Production, and Future Prospects - infinityPV, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://www.infinitypv.com/roll-to-roll-academy/solid-state-lithium-ion-batteries-advantages-production-and-future-prospects>
96. Understanding and Controlling the Degradation Mechanisms at Cathode-Electrolyte Interfaces in All-Solid-State Lithium-Ion Batteries - DSpace@MIT, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/153078>
97. QuantumScape: Building the Best Solid State Battery, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://www.quantumscape.com/>
98. Top 10: Solid-State Battery Developers - EV Magazine, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://evmagazine.com/top10/top-10-solid-state-battery-developers>
99. Solid Power Reports First Quarter 2025 Results, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://www.solidpowerbattery.com/investor-relations/investor-news/news-details/2025/Solid-Power-Reports-First-Quarter-2025-Results/default.aspx>
100. Top 3 Pure-Play Battery Stocks to Watch in 2025 - CarbonCredits.com, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://carboncredits.com/top-3-pure-play-battery-stocks-to-watch-in-2025/>
101. Global Solid-State Car Battery Markets 2021-2030 with Toyota, Solid Power, QuantumScape, Samsung SDI & LG Chem Dominating - GlobeNewswire, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://www.globenewswire.com/news-release/2021/08/20/2283981/28124/en/Global-Solid-State-Car-Battery-Markets-2021-2030-with-Toyota-Solid-Power-QuantumScape-Samsung-SDI-LG-Chem-Dominating.html>
102. Top 10 Solid State Battery Companies 2024 - Delong Energy, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://www.delongtop.com/top-10-solid-state-battery-companies/>
103. Toyota to launch solid-state battery production by 2026 - CBT News, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://www.cbtnews.com/toyota-to-launch-solid-state-battery-production-by-2026/>
104. This Is When Solid-State Batteries Are Expected To Become Mainstream - Top

- Speed, fecha de acceso: julio 20, 2025,
<https://www.topspeed.com/when-solid-state-batteries-expected-to-become-mainstream/>
105. 55 Years of SAMSUNG SDI's Journey, fecha de acceso: julio 20, 2025,
<https://news.samsung-sdi.com/global/articleView?seq=286>
 106. Samsung SDI timeline by IDTechEx, fecha de acceso: julio 20, 2025,
<https://www.idtechex.com/en/timeline/samsung-sdi/c70336>
 107. Cost of solid state batteries: Expensive premium solution or affordable all-rounder?, fecha de acceso: julio 20, 2025,
<https://futurebattery.com/costs-of-solid-state-batteries-expensive-premium-solution-or-affordable-all-rounder/>
 108. Ultra-high throughput manufacturing method for composite solid-state electrolytes - PMC, fecha de acceso: julio 20, 2025,
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7840479/>
 109. Prospects on large-scale manufacturing of solid state batteries, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://par.nsf.gov/servlets/purl/10231592>
 110. Why This Ultra Cheap Battery Breakthrough Matters - YouTube, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://www.youtube.com/watch?v=qZ8z5tFzulw>
 111. Solid-State vs. Lithium-Ion Batteries: Which Is Best? - Revolutionized, fecha de acceso: julio 20, 2025, <https://revolutionized.com/solid-state-vs-lithium-ion/>
 112. The battery supply chain and critical minerals dependence - Redwood Materials, fecha de acceso: julio 20, 2025,
<https://www.redwoodmaterials.com/resources/critical-minerals-and-battery-materials-supply-chain/>
 113. 2021-2024-Four Year Review of Supply Chains for the Advanced Batteries Sector - Department of Energy, fecha de acceso: julio 20, 2025,
<https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-12/20212024-Four%20Year%20Review%20of%20Supply%20Chains%20for%20the%20Advanced%20Batteries%20Sector.pdf>
 114. The cobalt and lithium global supply chains: status, risks and recommendations, fecha de acceso: julio 20, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/374025137_The_cobalt_and_lithium_global_supply_chains_status_risks_and_recommendations
 115. Friendshoring the Lithium-Ion Battery Supply Chain: Final Assembly and End Uses - CSIS, fecha de acceso: julio 20, 2025,
<https://www.csis.org/analysis/friendshoring-lithium-ion-battery-supply-chain-final-assembly-and-end-uses>
 116. Friendshoring the Lithium-Ion Battery Supply Chain: Battery Cell Manufacturing - CSIS, fecha de acceso: julio 20, 2025,
<https://www.csis.org/analysis/friendshoring-lithium-ion-battery-supply-chain-battery-cell-manufacturing>
 117. QuantumScape's Path to Commercialization - Nasdaq, fecha de acceso: julio 20, 2025,
<https://www.nasdaq.com/articles/quantumscape-path-commercialization>