

Informe Integral sobre Sistemas de Almacenamiento de Energía por Gravedad

Capítulo 1: Documento Informativo (Briefing Document)

1.0 Resumen Ejecutivo

La transición global hacia un sistema energético descarbonizado depende fundamentalmente de la integración masiva de fuentes renovables como la solar y la eólica. Sin embargo, la naturaleza intermitente de estas tecnologías presenta un desafío significativo para la estabilidad de las redes eléctricas, creando una necesidad urgente de soluciones de almacenamiento de energía a gran escala y de larga duración. En este contexto, los Sistemas de Almacenamiento de Energía por Gravedad (GES, por sus siglas en inglés) han surgido como una alternativa prometedora a las baterías químicas convencionales. Este documento informativo sintetiza el estado actual de la tecnología de almacenamiento por gravedad, evaluando sus principios fundamentales, el panorama de las tecnologías emergentes, los impulsores del mercado y los desafíos críticos que enfrenta en su camino hacia la viabilidad comercial.

A continuación, se presentan los hallazgos fundamentales de este análisis:

- **Principio Operativo y Propósito:** Los Sistemas de Almacenamiento de Energía por Gravedad operan bajo un principio físico simple: utilizan el exceso de electricidad de la red para levantar una masa pesada a una altura determinada, convirtiendo la energía eléctrica en energía potencial gravitacional. Cuando se necesita energía, la masa se baja de forma controlada, y la energía potencial se convierte de nuevo en electricidad a través de un generador. Su propósito principal es almacenar energía durante horas de baja demanda o alta producción renovable para despacharla durante los picos de demanda, estabilizando así la red eléctrica.
- **Comparación de Tecnologías:** La tecnología GES dominante y probada es la Central Hidroeléctrica de Bombeo (PSH), que utiliza agua como masa y representa más del 95% de la capacidad de almacenamiento de energía a escala de red en el mundo. Sus estrictos requisitos geográficos y su impacto ambiental han impulsado el desarrollo de alternativas innovadoras. Entre ellas destacan los sistemas de trenes de gravedad (ARES), los sistemas de elevación de bloques de hormigón (Energy Vault), la reutilización de pozos mineros (Gravitricity) y el concepto de pistones de roca levantados por presión de agua (Heindl Energy).
- **Estado del Mercado y Desafíos:** El mercado de GES, excluyendo PSH, se encuentra en una etapa incipiente pero con un potencial de crecimiento significativo, impulsado por la inversión en renovables y la necesidad de almacenamiento de larga duración. No obstante, la tecnología enfrenta desafíos considerables, incluyendo altos costos de inversión inicial y limitaciones geográficas. El principal obstáculo es la competencia con las baterías de iones de litio, cuyos costos han disminuido drásticamente, y con la escala probada del PSH.
- **Debate sobre Viabilidad y el Obstáculo Físico Fundamental:** Existe un debate crítico sobre la viabilidad práctica de las tecnologías GES emergentes. Mientras los desarrolladores prometen altas eficiencias y largas vidas útiles, la física fundamental de la baja densidad energética de la gravedad presenta un formidable desafío económico.



Para almacenar una cantidad de energía comparable a la de una batería química, se requiere una escala inmensa de masa y altura, lo que implica una infraestructura masiva y costosa que pone en duda la competitividad de muchos conceptos no-PSH.

Este informe procede a un análisis detallado de cada uno de estos aspectos, proporcionando una visión integral del potencial y las limitaciones de los sistemas de almacenamiento de energía por gravedad en la transición energética global.

1.1 Principios Fundamentales del Almacenamiento por Gravedad

Para evaluar con rigor la viabilidad y el potencial de las diversas tecnologías de almacenamiento de energía por gravedad, es indispensable comprender primero los principios físicos básicos que las gobiernan. El concepto de almacenar energía potencial es elemental, pero su aplicación a escala de red eléctrica revela desafíos de ingeniería y escala formbilidades. Una comprensión clara de la relación entre masa, altura y energía almacenada es la piedra angular para diferenciar las propuestas teóricamente posibles de las soluciones prácticamente implementables.

Mecanismo de Conversión de Energía

Un Sistema de Almacenamiento de Energía por Gravedad (GES), o "batería de gravedad", es un dispositivo que almacena energía aprovechando la fuerza gravitacional de la Tierra. El proceso de conversión de energía se desarrolla en dos fases cíclicas:

1. **Fase de Carga:** Durante los períodos en que la red eléctrica tiene un excedente de energía (por ejemplo, en horas de alta producción solar o eólica y baja demanda), esta electricidad se utiliza para accionar motores, grúas o bombas. Estos mecanismos realizan un trabajo mecánico al levantar una masa considerable (como agua, bloques de hormigón, trenes pesados o rocas) en contra de la fuerza de gravedad, desde una posición más baja a una más alta. Este proceso convierte la energía eléctrica en energía potencial gravitacional, que queda almacenada en la masa elevada.
2. **Fase de Descarga:** Cuando la demanda de electricidad en la red supera la oferta, o cuando las fuentes renovables no están generando, se invierte el proceso. La masa elevada se deja descender de manera controlada por la fuerza de la gravedad. A medida que desciende, su energía potencial se convierte en energía cinética. Esta energía de movimiento se utiliza para accionar un generador (a menudo, el mismo motor de la fase de carga funcionando en modo inverso), que convierte la energía mecánica de nuevo en energía eléctrica, la cual es inyectada en la red.

La cantidad máxima de energía que se puede almacenar está definida por la fórmula fundamental de la energía potencial gravitacional:

$$U = mgh$$

Donde:

- **U** es la energía potencial almacenada, medida en julios (J).
- **m** es la masa del objeto que se levanta, medida en kilogramos (kg).
- **g** es la aceleración debida a la gravedad (aproximadamente 9.8 m/s^2 en la superficie de la Tierra).
- **h** es la altura vertical a la que se eleva la masa, medida en metros (m).



Esta ecuación subraya una realidad ineludible: para almacenar una cantidad significativa de energía a escala de red (medida en megavatios-hora o gigavatios-hora), se deben maximizar tanto la **masa (m)** como la **altura (h)**. Un bloque de 1,000 kg levantado 100 metros almacena 980,000 julios, lo que equivale a solo 0.28 kilovatios-hora (kWh), una cantidad de energía apenas suficiente para hervir una olla de agua. Este simple cálculo ilustra por qué las soluciones GES viables deben operar con masas de miles o millones de toneladas y/o diferencias de altura de cientos de metros. Estos principios físicos fundamentales son la base sobre la cual se diseñan y evalúan las diversas tecnologías que los aplican en la práctica.

1.2 Panorama de las Tecnologías de Almacenamiento por Gravedad

La aplicación de los principios del almacenamiento por gravedad ha dado lugar a un espectro diverso de tecnologías, que van desde métodos probados y dominantes hasta conceptos innovadores en fase de prototipo y comercialización. Analizar este panorama es crucial para comprender las fortalezas, debilidades, nichos de aplicación y el potencial competitivo de cada enfoque. A continuación, se detallan las principales tecnologías GES, comparando su funcionamiento, ventajas y limitaciones.

1.2.1 Centrales Hidroeléctricas de Bombeo (PSH)

Las Centrales Hidroeléctricas de Bombeo (PSH) son la forma más antigua, extendida y de mayor capacidad de almacenamiento por gravedad, representando más del 95% de la capacidad a escala de red a nivel mundial.

- **Funcionamiento:** Un sistema PSH consta de dos grandes embalses de agua a diferentes altitudes. Durante los períodos de exceso de energía, el agua se bombea desde el embalse inferior al superior. Cuando se necesita electricidad, el agua se libera, fluyendo a través de turbinas.
- **Ventajas:** Su principal ventaja es su capacidad masiva (gigavatios-hora), tecnología madura y alta eficiencia (75%-85%).
- **Desventajas:** Su dependencia de una geografía montañosa y el considerable impacto ambiental de la construcción de presas son el principal motivador para la búsqueda de tecnologías GES alternativas.

1.2.2 Sistemas de Trenes de Gravedad (ARES)

Advanced Rail Energy Storage (ARES) ha desarrollado un sistema que utiliza trenes pesados en una pendiente.

- **Funcionamiento:** Una flota de vagones automatizados y cargados con masas pesadas utiliza el exceso de energía para subir una pendiente. Para generar electricidad, los vagones descienden utilizando el frenado regenerativo.
- **Ejemplo Concreto:** La instalación "GravityLine" en Nevada está diseñada para proporcionar 50 MW de potencia. Utiliza trenes de 300 toneladas en una vía de 9.2 kilómetros con una pendiente del 7.2%, declarando una eficiencia del 80%. Este diseño, aunque menos restrictivo que el PSH, ilustra directamente el problema de la baja densidad energética, requiriendo un vasto terreno para lograr la altura necesaria.

1.2.3 Sistemas de Elevación de Pesos (LWS)



Los Sistemas de Elevación de Pesos (LWS) levantan masas sólidas verticalmente. Dos exponentes principales son Energy Vault y Gravitricity.

- **Energy Vault:** Esta empresa suiza utiliza grúas y sistemas de elevación para mover bloques pesados. Su diseño más reciente, el "edificio-batería" EVx, es una estructura cerrada. La primera planta comercial en Rudong (China), operativa desde 2024, tiene una capacidad de 100 MWh y utiliza más de 3,500 bloques de 25 toneladas. Destaca por su propuesta de fabricar los bloques con materiales de desecho como tierra excavada o cenizas de carbón.
- **Gravitricity:** Esta empresa escocesa reutiliza pozos mineros en desuso. El sistema utiliza un cabrestante eléctrico para subir y bajar pesos masivos (de 500 a 5,000 toneladas). La empresa construyó un prototipo de 250 kW en Escocia y declara una vida útil de 50 años. Su enfoque es un intento directo de mitigar los masivos costos de construcción que enfrentarían otros sistemas, aprovechando infraestructura existente para obtener la altura necesaria.

1.2.4 Almacenamiento por Pistón de Roca (Heindl Energy)

Heindl Energy ha propuesto un concepto que consiste en separar un cilindro masivo de roca del lecho rocoso.

- **Funcionamiento:** Durante el exceso de energía, se bombea agua a alta presión debajo de este "pistón", levantándolo. Para generar electricidad, el agua se libera de forma controlada, y su presión hace girar turbinas mientras el pistón desciende.
- **Ventajas y Escalabilidad:** Declara una eficiencia superior al 80% y una vida útil de más de 60 años. Su principal atractivo es la escalabilidad económica: duplicar el diámetro del pistón multiplica por dieciséis la capacidad de almacenamiento, mientras los costos de construcción solo se cuadruplican. Sin embargo, este concepto enfrentaría enormes costos iniciales de construcción en un sitio nuevo (greenfield).

La diversidad de estos enfoques demuestra el dinamismo del sector, aunque su éxito final dependerá de su capacidad para superar los desafíos económicos y de ingeniería inherentes a la manipulación de masas a tan gran escala.

1.3 Mercado, Ventajas y Desafíos

Para determinar el futuro de los GES, es crucial evaluar el entorno comercial y los desafíos técnicos y económicos que deben superar. Su viabilidad no solo depende de la solidez de sus principios físicos, sino también de su competitividad frente a alternativas consolidadas como las baterías de iones de litio y el PSH.

Impulsores, Ventajas y el Obstáculo Físico Fundamental

- **Impulsores del Mercado:**
 - **Inversión en Renovables:** El crecimiento de la energía solar y eólica crea una demanda masiva de almacenamiento para gestionar su intermitencia.
 - **Necesidad de Almacenamiento de Larga Duración:** A medida que aumenta la penetración de renovables, se necesitan sistemas que puedan almacenar energía durante horas o días. Este es el nicho donde la principal ventaja de los GES —su



longevidad— ofrece una ventaja teórica sobre las baterías de iones de litio (10-15 años de vida útil), justificando su alta inversión inicial.

- **Apoyo Normativo e Incentivos:** Los gobiernos están implementando políticas para promover el almacenamiento de energía como un componente clave de la descarbonización.
- **Avances Tecnológicos:** La innovación en materiales y la integración de herramientas digitales están mejorando la eficiencia y rentabilidad de los sistemas GES.
- **Ventajas Estratégicas:**
 - **Sostenibilidad y Materiales:** Los GES utilizan materiales abundantes y de bajo impacto como roca, agua y hormigón, con potencial para usar materiales de desecho.
 - **Longevidad y Durabilidad:** Con una vida útil declarada de 50 a 60 años o más, superan con creces a las baterías químicas, que se degradan con cada ciclo.
 - **Bajo Impacto Ambiental Operativo:** No utilizan productos químicos peligrosos ni generan residuos tóxicos.
 - **Servicios a la Red y Seguridad:** Pueden proporcionar servicios de estabilización de red, como la **capacidad de arranque negro (black start capability)**, y no presentan riesgo de incendio.
- **El Desafío Físico y Económico Fundamental: La Baja Densidad Energética** Más que un simple desafío, la baja densidad energética de la gravedad es una **restricción fundamental basada en la física elemental** que gobierna la viabilidad de todos los sistemas GES no-PSH. Como lo articula el analista Michael Barnard, este principio explica por qué estos sistemas requieren una escala de infraestructura masiva, altos costos de capital y enfrentan una economía cuestionable. La energía potencial gravitacional ($U = mgh$) es inherentemente una forma de energía de baja densidad. Para almacenar una cantidad significativa de energía, se requieren masas y/o alturas inmensas. Barnard ilustra este punto con cálculos directos: un tren de carga de 6,500 toneladas que gana 180 metros de altura en 10 km de vía almacenaría solo 3.2 MWh, menos que un contenedor de baterías Tesla Megapack. Del mismo modo, una torre de agua típica almacena solo una décima parte de la energía de un Megapack. Esta crítica no es una opinión, sino la lente a través de la cual se deben evaluar todas estas tecnologías: su viabilidad económica está directamente limitada por la escala masiva de infraestructura necesaria para superar esta restricción física.

En última instancia, el futuro de los GES dependerá de su capacidad para encontrar nichos de mercado, especialmente en el almacenamiento de muy larga duración, donde su longevidad pueda compensar su alta inversión inicial y su menor densidad energética.

1.4 Impacto en la Neutralidad de Carbono Global

La transición hacia la neutralidad de carbono es el desafío definitorio de nuestra era, y superar la intermitencia de las energías renovables es uno de sus obstáculos más críticos. Los GES se



posicionan como una herramienta potencialmente clave en este esfuerzo, ofreciendo una solución mecánica, duradera y sostenible para estabilizar las redes eléctricas.

Síntesis del Impacto Potencial

El papel de los GES en la descarbonización se puede analizar desde dos perspectivas: la estabilización de la red y la sostenibilidad intrínseca de la tecnología.

1. **Estabilización de la Red y Habilitación de las Renovables:** El principal aporte de los GES es su capacidad para desacoplar la generación de energía del consumo. Pueden absorber el excedente de energía producido durante los picos de generación renovable y despacharlo durante los picos de demanda. Al proporcionar esta capacidad, los GES permiten que las fuentes renovables funcionen de manera más parecida a las fuentes de energía de carga base, reduciendo drásticamente la necesidad de centrales de combustibles fósiles para responder a las fluctuaciones de la demanda.
2. **Sostenibilidad del Ciclo de Vida:** Más allá de su función operativa, los GES ofrecen ventajas de sostenibilidad que los distinguen de las baterías químicas.
 - **Materiales Ecológicos y Duraderos:** Los componentes centrales de los GES (roca, agua, hormigón) tienen un ciclo de vida largo y un impacto ambiental relativamente bajo. La posibilidad de utilizar materiales de desecho locales mejora aún más su perfil de sostenibilidad.
 - **Longevidad y Mínima Degradación:** Con una vida útil de 50 a 60 años o más y una capacidad que no se degrada, los GES representan una inversión de infraestructura a largo plazo. Esto contrasta con las baterías de iones de litio, que requieren reemplazo y reciclaje, procesos que consumen energía y recursos.

Conclusión del Capítulo

En conclusión, los Sistemas de Almacenamiento de Energía por Gravedad representan una dualidad fascinante. Por un lado, son una tecnología conceptualmente simple y sostenible con un enorme potencial teórico. Por otro lado, la baja densidad energética inherente a la gravedad impone formidables desafíos de ingeniería, escala y viabilidad económica. El éxito de los GES dependerá de su capacidad para demostrar su valía en proyectos comerciales a gran escala, encontrando el equilibrio adecuado entre la innovación audaz y las duras realidades de la física y la economía.

Capítulo 2: Guía de Estudio

Este capítulo está diseñado como una herramienta pedagógica para consolidar la comprensión de los conceptos clave, las tecnologías y los debates en torno a los sistemas de almacenamiento de energía por gravedad. A través de un cuestionario de comprensión, preguntas de ensayo y un glosario de términos, esta guía facilita un autoaprendizaje efectivo.

Cuestionario de Comprensión

1. ¿Cuál es el principio físico fundamental que permite a las baterías de gravedad almacenar y liberar energía?



2. ¿Por qué las Centrales Hidroeléctricas de Bombeo (PSH) son consideradas tanto un tipo de batería de gravedad como el punto de referencia para nuevas tecnologías?
 3. Nombra dos ventajas clave de los sistemas GES en comparación con las baterías de iones de litio en términos de ciclo de vida y materiales.
 4. Describe brevemente cómo funciona el sistema ARES Gravity Train.
 5. ¿Qué crítica principal se hace a los sistemas GES no-PSH en términos de densidad energética y escala?
 6. ¿Cómo planea la empresa Energy Vault utilizar materiales de desecho en sus bloques de almacenamiento?
 7. ¿Qué ventaja ofrecen los pozos de minas en desuso para sistemas como el de Gravitricity?
 8. Explica el concepto del sistema de pistón de roca de Heindl Energy.
 9. ¿Cuál es la eficiencia de ida y vuelta (round-trip efficiency) que declaran la mayoría de los sistemas GES?
 10. ¿Qué papel juegan los GES en la integración de fuentes de energía renovables como la solar y la eólica en la red eléctrica?
-

Clave de Respuestas

1. El principio fundamental es la conversión de energía eléctrica en energía potencial gravitacional. Esto se logra utilizando electricidad para levantar una masa pesada a una cierta altura; la energía se libera convirtiendo nuevamente esa energía potencial en electricidad al bajar la masa de forma controlada.
2. Las PSH son un tipo de batería de gravedad porque utilizan el principio de levantar una masa (agua) para almacenar energía. Son el punto de referencia debido a que es la tecnología de almacenamiento a gran escala más madura y de mayor capacidad del mundo, estableciendo un estándar de rendimiento, escala y costo con el que las nuevas tecnologías deben compararse.
3. Una ventaja clave es su longevidad, con una vida útil declarada de 50 a 60 años, muy superior a los 10-15 años de las baterías de iones de litio. Otra ventaja es el uso de materiales sostenibles y abundantes como roca, agua y hormigón, en lugar de metales escasos y problemáticos como el litio y el cobalto.
4. El sistema ARES utiliza trenes cargados con masas pesadas en una vía con pendiente. Para almacenar energía, los trenes usan electricidad de la red para subir la pendiente; para generar energía, descienden utilizando el frenado regenerativo para convertir la energía potencial en electricidad.
5. La principal crítica es que tienen una baja densidad energética, lo que significa que se necesitan masas y/o alturas inmensas para almacenar una cantidad significativa de energía. Esto hace que la infraestructura requerida sea masiva y costosa, cuestionando su viabilidad económica en comparación con soluciones más compactas.



6. Energy Vault planea fabricar sus bloques con materiales de desecho como tierra excavada, cenizas de carbón o palas de aerogeneradores fuera de servicio trituradas. Esto reduce costos, minimiza el impacto ambiental y promueve una economía circular.
 7. Los pozos de minas en desuso ofrecen una profundidad significativa (altura) ya excavada, lo que reduce drásticamente los costos de construcción y el impacto ambiental en la superficie, aprovechando una infraestructura industrial existente.
 8. El sistema de Heindl Energy consiste en separar un cilindro masivo de roca del lecho rocoso. Para almacenar energía, se bombea agua a presión debajo de este "pistón" para levantarlo; para generar electricidad, se libera el agua para que su presión impulse turbinas mientras el pistón desciende.
 9. La mayoría de los desarrolladores de sistemas GES, incluyendo ARES y Heindl Energy, declaran una eficiencia de ida y vuelta del 80% al 90%, un rango competitivo con el PSH y las baterías de iones de litio.
 10. Los GES almacenan el excedente de energía generado por fuentes solares y eólicas durante sus picos de producción. Luego, despachan esta energía cuando la demanda es alta o la generación es baja, ayudando a estabilizar la red y a reducir la dependencia de los combustibles fósiles.
-

Preguntas de Ensayo

1. Compara y contrasta la viabilidad, escalabilidad e impacto ambiental de las Centrales Hidroeléctricas de Bombeo (PSH) con dos tecnologías emergentes de GES (por ejemplo, Energy Vault y ARES Gravity Trains).
 2. Analiza el argumento de que el almacenamiento por gravedad es "física de 7º grado". Evalúa la validez de esta crítica discutiendo los desafíos de ingeniería, económicos y de escala necesarios para que estas tecnologías sean competitivas a nivel de red.
 3. Discute los factores económicos que impulsan y limitan la adopción de los sistemas GES. ¿Cómo se comparan sus costos de inversión inicial, vida útil y costos operativos con los de las baterías de iones de litio para el almacenamiento de energía de larga duración?
 4. Evalúa el papel potencial de los GES en la consecución de la neutralidad de carbono global. ¿Qué desafíos específicos de la energía renovable abordan y cuán eficazmente pueden integrarse en las redes eléctricas existentes?
 5. Explora los diferentes enfoques para el uso de materiales en los sistemas GES (agua, hormigón, residuos, roca natural). Analiza las implicaciones de sostenibilidad y coste de cada enfoque.
-

Glosario de Términos Clave

- **Almacenamiento de Energía por Gravedad (GES):** Un tipo de sistema de almacenamiento que convierte la energía eléctrica en energía potencial gravitacional levantando una masa, y la convierte de nuevo en electricidad bajando esa masa.



- **ARES (Advanced Rail Energy Storage):** Una empresa y tecnología que utiliza trenes pesados en una pendiente para almacenar y liberar energía mediante el movimiento ascendente y el frenado regenerativo descendente.
- **Batería de Gravedad:** Término común para un dispositivo de almacenamiento de energía por gravedad (GES).
- **Capacidad de Arranque Negro (Black Start Capability):** La habilidad de un sistema de almacenamiento para restaurar la energía sin depender de la red eléctrica externa, crucial después de un apagón generalizado.
- **Central Hidroeléctrica de Bombeo (PSH):** La forma más común de almacenamiento a gran escala, donde se bombea agua entre dos embalses a diferentes altitudes para almacenar y generar energía.
- **Densidad Energética:** La cantidad de energía que se puede almacenar en un sistema por unidad de volumen o masa. Los sistemas GES no-PSH son criticados por su baja densidad energética.
- **Eficiencia de Ida y Vuelta (Round-trip Efficiency):** La relación entre la energía que se descarga de un sistema de almacenamiento y la energía que se cargó en él, expresada como un porcentaje.
- **Energía Potencial Gravitacional:** La energía que un objeto posee debido a su posición en un campo gravitacional. Se calcula con la fórmula $U = mgh$.
- **Energy Vault:** Una empresa que desarrolla tecnología GES utilizando sistemas de elevación para mover grandes bloques de hormigón o materiales de desecho.
- **Gigavatio-hora (GWh):** Una unidad de energía equivalente a 1,000 megavatios-hora, utilizada para medir la capacidad de almacenamiento a muy gran escala.
- **Gravitricity:** Una empresa que desarrolla tecnología GES utilizando cabrestantes para subir y bajar pesos masivos en pozos de minas en desuso.
- **Heindl Energy:** Una empresa que desarrolla un concepto de GES que utiliza un pistón masivo de roca levantado por presión de agua.
- **Intermitencia:** La característica de ciertas fuentes de energía, como la solar y la eólica, de no estar disponibles de manera continua y predecible.
- **Kilovatio-hora (kWh):** Una unidad de energía comúnmente utilizada para la facturación eléctrica, equivalente a 3.6 millones de julios.
- **Megavatio-hora (MWh):** Una unidad de energía equivalente a 1,000 kilovatios-hora, comúnmente utilizada para medir la capacidad de almacenamiento a escala de red.
- **Neutralidad de Carbono:** El estado de equilibrio entre las emisiones de dióxido de carbono emitidas a la atmósfera y las eliminadas de ella.
- **Red Eléctrica:** La infraestructura interconectada para entregar electricidad desde los productores hasta los consumidores.



- **Sistemas de Elevación de Pesos (LWS):** Una categoría de tecnologías GES que levantan masas sólidas verticalmente para almacenar energía.

Esta guía proporciona un marco para profundizar en el dinámico campo del almacenamiento por gravedad, preparando el terreno para el análisis de las preguntas más frecuentes.

Capítulo 3: Preguntas Frecuentes (FAQs)

Esta sección aborda las diez preguntas más importantes y comunes sobre el almacenamiento de energía por gravedad, proporcionando respuestas claras y directas basadas en la información clave del informe para una comprensión rápida y accesible.

1. **¿Qué es exactamente una "batería de gravedad" y cómo funciona?** Una "batería de gravedad" es un sistema que almacena energía utilizando la fuerza de la gravedad. Funciona usando el exceso de electricidad para levantar un objeto muy pesado a una mayor altura, almacenando energía potencial. Cuando se necesita esa energía, el objeto se baja de forma controlada, y el movimiento descendente hace girar un generador para producir electricidad.
2. **¿Cuál es la principal diferencia entre el almacenamiento por bombeo hidroeléctrico y las nuevas tecnologías de gravedad?** La diferencia radica en la masa utilizada y los requisitos geográficos. El bombeo hidroeléctrico (PSH), la tecnología establecida, utiliza agua y requiere un terreno montañoso. Las nuevas tecnologías buscan ser más flexibles, utilizando masas sólidas como bloques de hormigón o trenes, lo que les permite ser construidas en una variedad más amplia de lugares.
3. **¿Son las baterías de gravedad más ecológicas que las baterías de iones de litio?** Se consideran más ecológicas a lo largo de su ciclo de vida. No utilizan metales conflictivos o tóxicos como el litio o el cobalto, y su vida útil es mucho más larga (50+ años frente a 10-15 años), lo que reduce la necesidad de reemplazo. Además, pueden utilizar materiales de desecho como masa, aumentando su sostenibilidad.
4. **¿Cuánta energía puede almacenar un sistema de gravedad típico?** La capacidad varía enormemente. Un sistema PSH puede almacenar miles de megavatios-hora (MWh). Entre las nuevas tecnologías, la planta de Energy Vault en China tiene una capacidad de 100 MWh, mientras que otros conceptos están diseñados para una escala de gigavatios-hora (GWh).
5. **¿Por qué se critica a algunas de estas tecnologías por su baja "densidad energética"?** Porque la gravedad es una fuerza relativamente débil para almacenar energía. Esto significa que se necesita levantar una masa extremadamente grande a una altura considerable para almacenar una cantidad útil de energía. La infraestructura masiva resultante puede hacerlas menos eficientes en términos de espacio y costo en comparación con las baterías químicas, que son mucho más compactas.
6. **¿Son estos sistemas económicamente competitivos? ¿Cuál es su costo?** Su competitividad es un tema central de debate. Tienen costos de inversión inicial muy altos, pero sus costos operativos son bajos y su vida útil es muy larga, lo que podría hacerlos más baratos a largo plazo. Actualmente, el costo inicial por kWh es a menudo más alto que el de las baterías de iones de litio.



7. **¿Cuánto tiempo pueden durar estos sistemas en comparación con las baterías tradicionales?** Los sistemas de gravedad tienen una vida útil significativamente más larga, proyectada en 50 a 60 años o más. Esto se debe a que sus componentes principales (masas de roca, hormigón) no se degradan. En contraste, las baterías de iones de litio tienen una vida útil de 10 a 15 años.
8. **¿Se puede construir una batería de gravedad en cualquier lugar?** No en cualquier lugar, pero sí en más sitios que el PSH. Cada tecnología tiene sus limitaciones: los sistemas de trenes necesitan pendientes largas, los sistemas de minas requieren pozos profundos abandonados, y los de pistón de roca necesitan geología estable. Los sistemas de torres de bloques son los más flexibles.
9. **¿Qué empresas son las líderes en el desarrollo de esta tecnología?** Además de los operadores de PSH, las empresas líderes en las nuevas tecnologías incluyen a Energy Vault (bloques de hormigón), Gravitricity (pozos de minas), ARES (trenes de gravedad) y Heindl Energy (pistón de roca). Energy Vault es una de las más avanzadas en la comercialización, con una planta ya operativa en China.
10. **¿Cuál es el papel más importante que podrían desempeñar las baterías de gravedad en el futuro de la energía?** Su papel más importante sería proporcionar almacenamiento de energía a gran escala y de larga duración. Esto es crucial para estabilizar las redes eléctricas a medida que dependen cada vez más de fuentes renovables intermitentes. Al almacenar energía limpia cuando es abundante y liberarla cuando es escasa, ayudan a garantizar un suministro eléctrico fiable y 100% renovable.

Si bien estas preguntas frecuentes aclaran el estado actual de los GES, la trayectoria futura de la tecnología, como se detalla en la siguiente cronología histórica, revela una aceleración reciente y rápida de la innovación impulsada por las necesidades urgentes de la transición energética.

Capítulo 4: Cronología del Desarrollo del Almacenamiento por Gravedad

La evolución del almacenamiento de energía por gravedad es una historia que abarca desde principios mecánicos centenarios hasta proyectos de ingeniería de vanguardia del siglo XXI. Comprender esta trayectoria histórica permite apreciar tanto la simplicidad duradera del concepto como la reciente aceleración de la innovación, impulsada por la necesidad de soluciones para la transición energética.

A continuación se presenta una cronología de los hitos clave en el desarrollo de la tecnología:

- **1656:** Christiaan Huygens inventa el **reloj de péndulo**, una de las primeras aplicaciones prácticas que utiliza la energía potencial gravitacional (un peso descendente) para alimentar un movimiento mecánico de forma controlada.
- **1907:** Se desarrolla y pone en marcha el **primer sistema de bombeo hidroeléctrico (PSH)** en Suiza, marcando el nacimiento del almacenamiento de energía por gravedad a escala de red.
- **1930:** La tecnología de **almacenamiento por bombeo hidroeléctrico se introduce en los Estados Unidos**, iniciando su expansión en América del Norte.



- **1979:** Se pone en marcha la **planta de PSH de Markersbach en Alemania**, un ejemplo de las instalaciones a gran escala (hasta 4 GWh) que se construyeron en todo el mundo.
- **2011:** Se funda en Escocia la empresa **Gravitricity**, con el objetivo de desarrollar un sistema de almacenamiento utilizando pesos en pozos de minas en desuso.
- **2012:** Se desarrolla el primer prototipo funcional de **GravityLight**, una lámpara a pequeña escala alimentada por un peso descendente para zonas sin acceso a la red.
- **2017:** Se funda en Suiza la empresa **Energy Vault**, con el objetivo de comercializar un sistema de almacenamiento basado en grúas que mueven grandes bloques de hormigón.
- **2020:** ARES inicia la construcción de su instalación a escala de red, **GravityLine, en Nevada, Estados Unidos**, utilizando trenes pesados para estabilizar la red eléctrica.
- **2021:** El **prototipo de 250 kW de Gravitricity** en Edimburgo, Escocia, comienza sus operaciones de prueba y se conecta a la red, demostrando la viabilidad de su concepto.
- **2024:** Energy Vault pone en funcionamiento su **primera planta comercial a escala de red en Rudong, China**. Esta instalación de 100 MWh representa un hito clave en la comercialización de las nuevas tecnologías GES.

Esta cronología refleja una clara aceleración en la innovación y comercialización en la última década, lo que subraya el creciente reconocimiento de la necesidad de alternativas para construir un futuro energético resiliente.

Capítulo 5: Lista de Fuentes

La siguiente sección presenta la bibliografía de las fuentes consultadas y citadas para la elaboración de este informe. Cada referencia ha sido fundamental para construir un análisis equilibrado y basado en evidencia sobre el estado actual de los sistemas de almacenamiento de energía por gravedad.

1. Railway Supply. (2021, 5 de enero). *ARES Gravity Trains May Solve the Energy Storage Problem*. Railway Supply.
2. Mishra, D. (2025, 26 de febrero). *Advancements in Gravity Energy Storage and Their Impact on Global Carbon Neutrality*. Aranca. [Fecha de publicación anómala en la fuente original].
3. Enel Group. (2024, 19 de marzo). *Gravitational storage: old and new technologies for storing electricity*. Enel Group.
4. Bombatkar, A., Gawande, S., & Mapari, S. (2022, mayo). Gravity Based Energy Storage System. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology (IJARSCT)*, 2(5). DOI: 10.48175/568.
5. *Gravity Energy Storage Systems: A Study Guide*. (s.f.).
6. Barnard, M. (2024, 10 de junio). *Gravity Storage 101, Or Why Pumped Hydro Is The Only Remotely Real Gravity Storage*. CleanTechnica.
7. Heindl Energy GmbH. (2017, julio). *Gravity Storage*. [Folleto].



8. Wikipedia. (Consultado en 2024). *Gravity battery*.
9. DW Planet A. (s.f.). *How to use gravity to store energy*. [Transcripción de video de YouTube].
10. Reddit. (s.f.). *Is this even viable?*. r/physicsgifs. [Hilo de discusión].

Este informe ha buscado ofrecer una visión exhaustiva y objetiva de una tecnología que, si bien se basa en uno de los principios más antiguos de la física, se encuentra en la vanguardia de la innovación energética. La importancia de continuar monitoreando el desarrollo y la implementación de estas tecnologías será fundamental a medida que el mundo avanza en su transición hacia un futuro energético verdaderamente sostenible.

Este documento podría contener información inexacta; le rogamos verificar su contenido. Para más información, visite la web PowerBroadcasts.com

