



ACADEMIA DE LAS CIENCIAS  
Y LAS ARTES MILITARES

Comunicaciones académicas

## Tecnologías de almacenamiento de energía y su empleo militar

Manfredo Monforte Moreno

Academia de las Ciencias y las Artes Militares  
Sección de Prospectiva de la Tecnología Militar

26 de junio de 2025

### Introducción

Aunque las fuentes renovables de generación de energía eléctrica han protagonizado un enorme desarrollo en los últimos años y compiten con otras fuentes, como la procedente de centrales nucleares o de ciclo combinado, el gran problema es el mantenimiento del suministro en caso de roturas del flujo. En algunas instalaciones militares, el requisito es muy exigente: mantener el suministro durante varios días, incluso catorce, tiempo que se estima que puede demorar la recuperación de las fuentes convencionales tras sufrir un ataque grave en la red de distribución. Si bien los grupos electrógenos pueden paliar el problema de suministro, el consumo de combustible es relativamente importante —y caro— lo que obliga a mantener la cadena logística como garantía del reabastecimiento, algo que no siempre es posible en zonas hostiles. También pueden beneficiarse de los nuevos desarrollos aquellas infraestructuras críticas cuyo funcionamiento depende del suministro eléctrico (y son casi todas).

El gran apagón sufrido en España, Portugal y sur de Francia el lunes 28 de abril de 2025 supuso un enorme perjuicio económico y social. Algunos centros pudieron mantener su actividad gracias a los grupos electrógenos y otras fuentes de almacenamiento, aunque el tiempo que se tardó en recuperar el suministro eléctrico superó en algunos casos las capacidades de los sistemas de respaldo. Repasaremos brevemente las tecnologías disponibles y su aplicación en despliegues en los que no hay acceso a las redes fijas.



*Imagen generada por IA por Manfredo Monforte*

## Almacenamiento mecánico

Son tecnologías que almacenan la energía en forma de energía potencial o cinética. Entre ellas:

- **Bombeo Hidroeléctrico (PHS - Pumped Hydro Storage):** es la tecnología de almacenamiento a gran escala más madura, eficiente y utilizada. Consiste en dos embalses a diferentes alturas. Durante los periodos de baja demanda de electricidad, se bombea agua desde el embalse inferior al superior, almacenando energía potencial. Cuando la demanda es alta, el agua se libera para fluir hacia el embalse inferior, haciendo girar turbinas que generan electricidad. No tiene aplicación militar. Como ventajas, destacan la alta eficiencia (70-85%), vida útil, gran capacidad de almacenamiento; probada y

rentable a gran escala. Sin embargo, no está carente de inconvenientes, pues requiere una orografía específica (dos embalses a distinta cota), tiene un alto impacto ambiental inicial y sus tiempos de respuesta son moderados. Además, no es posible su uso en periodos de sequía prolongada, una situación que se da en ocasiones en ciertas regiones españolas.

- Almacenamiento por Aire Comprimido (CAES - *Compressed Air Energy Storage*): almacena el aire atmosférico a altas presiones en depósitos subterráneos (minas abandonadas, acuíferos). Cuando se necesita electricidad, el aire comprimido se libera y se expande a través de una turbina, generando electricidad. No tiene aplicación militar. Presenta las ventajas de su gran capacidad, comparable al bombeo hidroeléctrico, y su larga duración. En contra está el hecho de la disponibilidad de cavernas geológicas. Su eficiencia es menor que el PHS.
- Volantes de Inercia (*Flywheels*): consiste en un disco metálico de gran momento de inercia que gira a muy alta velocidad cuando se le aplica energía. La energía se almacena en forma de energía cinética y se libera al frenar el volante. No tiene aplicación militar dado el volumen y masa del volante necesario. Su ventaja principal es el tiempo de respuesta extremadamente rápido, además de su alta eficiencia y larga vida útil (muchos ciclos de carga/descarga). Sin embargo, la capacidad de almacenamiento es limitada, por lo que este sistema es apto sólo para aplicaciones de corta duración.
- Almacenamiento por gravedad (GES - *Gravity Energy Storage*): es una tecnología emergente que levanta bloques pesados (por ejemplo, de hormigón) en una torre cuando hay exceso de energía. Cuando se necesita electricidad, los bloques se bajan, haciendo girar un generador que produce electricidad. No tiene aplicación militar. Presenta un bajo impacto ambiental, una larga vida útil, utiliza materiales reciclados y un bajo coste en comparación con las baterías. Es una tecnología en desarrollo pendiente de su escalado comercial.

## Almacenamiento electroquímico (baterías)

Convierte la energía química en energía eléctrica y viceversa a través de reacciones reversibles.

- Baterías de Iones de Litio: son las baterías más populares y de mayor crecimiento en el mercado actual. Se utilizan en electrónica de consumo, vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento a pequeña y mediana escala, y cada vez más a gran escala en vehículos de propulsión eléctrica y drones. Son populares en su aplicación militar. Su principal ventaja es la alta densidad energética, gran eficiencia de carga/descarga, tamaño compacto,

peso ligero (salvo las que van en dotación del combatiente, que tienden a desecharse una vez agotadas) y larga vida útil en número de ciclos. Por el contrario, tienen un coste relativamente elevado, presentan riesgo de sobrecalentamiento si no se gestionan adecuadamente y dependen de recursos críticos como es el litio. Se están investigando mejoras como las baterías de estado sólido para aumentar la seguridad y densidad energética.

- **Baterías de Flujo:** almacenan la energía en tanques externos con electrolitos líquidos. A diferencia de las baterías convencionales, la potencia y la capacidad pueden escalarse independientemente, ya que la energía se almacena en los tanques y la potencia se genera en una pila de celdas. No tiene aplicación militar salvo en bases, acuartelamientos e instalaciones fijas. Son de larga duración, tienen una gran capacidad de almacenamiento, buena escalabilidad y ciclos de vida prolongados. Presentan una baja densidad energética en comparación con las de iones de litio, son de mayor tamaño y su diseño es más complejo.
- **Baterías de Sodio-Azufre (NaS):** utilizan ambos elementos fundidos como electrodos. Funcionan a altas temperaturas (300-350°C). En principio, su aplicación militar es muy limitada. Son de larga duración, tienen una buena eficiencia y resultan adecuadas para aplicaciones de gran escala. Requieren altas temperaturas de operación, lo que puede ser un factor de riesgo.
- **Baterías de estado sólido:** es una tecnología emergente que reemplaza el electrolito líquido de las baterías de iones de litio por un material sólido lo que proporciona más seguridad (menor riesgo de incendio), mayor densidad energética potencial y mayor vida útil. Se encuentra en fase de investigación y desarrollo y su producción a gran escala se prevé compleja y costosa.
- **Baterías de electrolito líquido (plomo-ácido convencional):** son las baterías tradicionales. Utilizan un electrolito líquido compuesto por una mezcla de ácido sulfúrico y agua destilada. Las placas de plomo están sumergidas en este líquido. En potencial eléctrico de cada vaso es de 2 V. Son de amplio uso militar. Suelen ser más económicas en comparación con otros tipos de baterías y ofrecen una alta capacidad de corriente de arranque, lo que las hace adecuadas para vehículos. Además, su fabricación es global y son fáciles de encontrar. Requieren mantenimiento regular, como la adición de agua destilada para reponer el líquido evaporado y existe riesgo de derrames de ácido si la batería se inclina o se daña, lo que resulta peligroso y muy corrosivo para los metales en contacto. Durante la carga y descarga, pueden emitir gases corrosivos e inflamables, lo que requiere buena ventilación. No soportan bien las descargas profundas frecuentes, lo que puede acortar su vida útil. Como es sabido, debido a la presencia de plomo, suelen ser pesadas y voluminosas en relación con su capacidad.

- Baterías de gel: son un tipo de batería de plomo-ácido regulada por válvula (VRLA - *Valve Regulated Lead-Acid*). A diferencia de las baterías de electrolito líquido, el ácido sulfúrico se mezcla con sílice para formar un gel espeso y gelatinoso que inmoviliza el electrolito. Tienen aplicación militar y se usan en vehículos de alta demanda energética, como los dotados del sistema *Stop&Start*. No requieren mantenimiento al tener el electrolito gelificado y estar selladas, por lo que no precisan de la adición de agua ni otros mantenimientos. El gel elimina por completo el riesgo de derrames, lo que las hace más seguras y versátiles en cuanto a su instalación. La consistencia del gel las hace más resistentes a las vibraciones y los impactos. Generalmente, tienen una vida útil más larga que las baterías de plomo-ácido convencionales, especialmente en aplicaciones de ciclo profundo, ya que soportan mejor las grandes descargas sin sufrir daños significativos, lo que las hace ideales para sistemas solares, vehículos militares y aplicaciones de energía de respaldo. Además, pierden muy poca carga cuando no están en uso, lo que permite almacenar energía durante periodos más largos y emiten muy pocos gases en condiciones normales, lo que las hace más seguras para usar en espacios cerrados o con poca ventilación. Son más caras que las baterías de plomo-ácido convencionales, presentando una gran sensibilidad a la sobrecarga, pues puede dañar irreversiblemente el gel y reducir su vida útil. Requieren un cargador específico o un regulador de carga adecuado.

## Almacenamiento térmico

Estas tecnologías almacenan energía en forma de calor o frío, que luego puede ser liberada para generar electricidad o para aplicaciones de calefacción/refrigeración.

- Sales fundidas: se utilizan comúnmente en centrales termo solares. El almacenamiento de energía mediante sales fundidas es una tecnología cada vez más relevante, especialmente en el contexto de la transición energética y la integración de fuentes renovables intermitentes como la energía solar y eólica. Las sales fundidas son mezclas de sales inorgánicas (comúnmente nitratos de sodio y potasio, también silicio elemental) que se funden hasta su estado líquido para almacenar energía térmica a altas temperaturas. El proceso generalmente funciona de la siguiente manera: la energía térmica (por ejemplo, proveniente de concentradores solares en una planta termo solar, o de electricidad convertida en calor mediante resistencias eléctricas) se transfiere a las sales, elevando su temperatura. Las sales fundidas se almacenan en un «tanque caliente» y permanecen en el depósito debidamente aislado, manteniendo la energía térmica debido a su alta capacidad de almacenamiento. Cuando se necesita la energía, las sales se bombean desde el tanque hacia un intercambiador de calor en el cual el calor se transfiere a un fluido de trabajo (como agua para generar vapor) que luego

puede utilizarse para generar electricidad (a través de una turbina y un generador) o para aplicaciones de calor industrial a sanitario. Las sales enfriadas se devuelven a un «tanque frío» para ser recalentadas en el siguiente ciclo. Estas tecnologías, de uso dual, presentan una alta capacidad de almacenamiento por unidad de volumen (lo que las hace ideales para proyectos a gran escala), con una larga duración de almacenamiento (días) con buena estabilidad y durabilidad, ya que las sales son químicamente estables y tienen una alta resistencia térmica y capacidad calorífica, lo que les permite soportar ciclos repetidos de carga y descarga sin degradarse significativamente. Aunque la inversión inicial puede ser considerable, resultan rentables en el largo plazo. Son sistemas seguros, no explosivos y no contaminantes. Las sales tienen un punto de fusión relativamente alto, lo que requiere mantener las tuberías y los tanques a una temperatura por encima de cierto valor para evitar que solidifiquen y obstruyan los circuitos; por ende, a temperaturas muy altas (por encima de los 600 C), existe un riesgo de descomposición de la sal y corrosión de los materiales de los recipientes y tuberías. La investigación se centra en el desarrollo de nuevas mezclas de sales y materiales resistentes a la corrosión. Si el objetivo es almacenar electricidad para luego convertirla de nuevo en electricidad, el proceso de «electricidad-calor-electricidad» puede ser menos eficiente que el almacenamiento directo en baterías. Sin embargo, su principal ventaja radica en el almacenamiento de calor a gran escala. En sectores como la defensa, la química o la metalurgia, donde se requieren rendimientos elevados, estos sistemas permiten recuperar y reutilizar calor residual, mejorando la eficiencia energética y reduciendo la dependencia de combustibles fósiles. En resumen, el almacenamiento de energía mediante sales fundidas es una tecnología madura y a la vez prometedora para el almacenamiento de energía térmica a gran escala, fundamental para la gestión de la energía en un futuro con mayor penetración de energías renovables y para la optimización de procesos industriales que requieren altas temperaturas. La energía del Sol almacenada se utiliza para generar vapor y accionar una turbina para producir electricidad, incluso después de que el astro rey se haya puesto. Los nuevos sistemas de recuperación de la energía usan elementos termo voltaicos. Pueden tener uso militar en instalaciones semipermanentes o fijas.

- Bloques de carbono: uno de los proyectos de la Agencia Americana de Proyectos Avanzados (ARPA-E) tiene el objetivo de desarrollar sistemas de almacenamiento energético de larga duración con el fin de dar respuesta a las futuras necesidades de consumo eléctrico en centros militares. Una de las tecnologías exploradas consiste en calentar por encima de 1.000° C bloques de carbono debidamente aislados mediante resistencias eléctricas para recuperarla en caso de necesidad con paneles termo voltaicos. El objetivo inicial es disponer de algunos megavatios durante más de 4 días.

- Almacenamiento de calor sensible: se almacena energía calentando o enfriando un medio (agua, rocas, arena). Por ejemplo, el hielo para refrigeración o rocas para calefacción. Pueden tener aplicación militar limitada. Con un coste relativamente bajo, los medios de almacenamiento son muy dispares. Presentan menor densidad energética que otras tecnologías y su uso es menos flexible.

### Almacenamiento químico (hidrógeno)

Se almacena energía en forma de hidrógeno, que puede producirse a partir de agua mediante electrólisis utilizando energía renovable (hidrógeno verde).

Pilas de combustible de hidrógeno: el hidrógeno se utiliza como combustible en una pila para generar electricidad a través de una reacción electroquímica con el oxígeno atmosférico o almacenado a presión. Su aplicación militar es cada vez más valorada. Puede almacenar energía por períodos muy largos, es versátil (combustible, materia prima, electricidad) y de cero emisiones en el punto de uso. Como contrapartida, es necesaria una fuerte inversión inicial en infraestructura (producción, transporte, almacenamiento) y la eficiencia del ciclo completo (producción a electricidad) es aún mejorable.

### Almacenamiento eléctrico directo

Supercondensadores: almacenan energía en un campo electrostático, no mediante reacciones químicas. Produce carga y descarga extremadamente rápida con muy alta potencia y larga vida útil. Por contra, entregan una baja densidad energética (almacenan menos energía que las baterías para su tamaño) y sus descargas son más rápidas que la de las baterías. Son sistemas aptos para aplicaciones que requieren ráfagas rápidas de energía.

### Factores clave al elegir una tecnología de almacenamiento de energía (militar):

- Coste: coste inicial y coste del ciclo de vida.
- Facilidad de transporte y despliegue en instalaciones militares semipermanentes.
- Eficiencia: porcentaje de energía que se recupera después del almacenamiento.
- Densidad energética: cantidad de energía que se puede almacenar por unidad de volumen o peso.

- Densidad de potencia: velocidad a la que la energía puede ser liberada o absorbida.
- Vida útil: número de ciclos de carga/descarga que el sistema puede soportar.
- Escala: adecuación para aplicaciones a pequeña, mediana o gran escala.
- Impacto ambiental: huella de carbono, uso de materiales, reciclabilidad.
- Tiempo de respuesta: rapidez con la que el sistema puede activarse.
- Peligrosidad: sensibilidad para iniciar un fuego o liberar agentes corrosivos o tóxicos.
- Vulnerabilidad a las acciones enemigas.

El desarrollo y la implementación de estas tecnologías, muchas de ellas duales, son cruciales para la estabilidad de la red eléctrica, la integración de energías renovables, la movilidad eléctrica y la descarbonización de la economía. Un dato apoya el desarrollo de estas tecnologías: el 30 % de las bajas norteamericanas en Iraq se produjeron durante la escolta de convoyes de combustible. El coste de cada litro de combustible fósil para hacerlo llegar a un destacamento aislado era superior a 80 dólares. ■

**Nota:** Las ideas y opiniones contenidas en este documento son de responsabilidad del autor, sin que reflejen, necesariamente, el pensamiento de la Academia de las Ciencias y las Artes Militares.

© Academia de las Ciencias y las Artes Militares - 2025