Apuntes completos

Energy Storage

Todas las tecnologías

Máster Universitario en Ingeniería de la Energía

ETSI Minas y Energía

Hugo Torres Orejudo

Noviembre 2026

Elaborado con IA a partir del material de la asignatura. Material no oficial.

Versión v1.0

Índice general

1 Introducción: por qué almacenar **2**
1.1 El problema . . . 2
1.2 Clasificación . . . 2
1.3 Parámetros para comparar . . . 2
1.4 Coste normalizado del almacenamiento (LCOS) . . . 3

2 Almacenamiento térmico **3**
2.1 Calor sensible . . . 3
2.2 Calor latente: materiales de cambio de fase (PCM) . . . 3
2.3 Almacenamiento termoquímico . . . 4

3 Aire comprimido (CAES) **4**
3.1 Fundamento . . . 4
3.2 Tipos . . . 4
3.3 Compresión por etapas . . . 4

4 Aire líquido (LAES) **5**

5 Baterías **5**
5.1 Funcionamiento . . . 5
5.2 Tecnologías . . . 5
5.3 Conceptos de operación . . . 6

6 Volantes de inercia **6**

7 Supercondensadores **6**

8 Hidrógeno y vectores energéticos **6**

9 Tabla comparativa **7**

10 Ideas que se suelen confundir **7**

Resumen

Resumen en español de toda la asignatura, que se imparte en inglés: por qué hace falta almacenar, cómo se comparan las tecnologías y cada una de ellas (térmico sensible, latente y termoquímico, aire comprimido, aire líquido, baterías, volantes, supercondensadores e hidrógeno). Los términos originales van en cursiva para enlazar con las transparencias. Las pruebas de la asignatura son sobre todo de tipo test conceptual: al final hay una tabla comparativa y una lista de ideas que se suelen confundir. Los cálculos están en el documento de ejercicios resueltos.

1 Introducción: por qué almacenar

1.1 El problema

La generación renovable variable (eólica y solar) no coincide en el tiempo con la demanda. El almacenamiento desacopla producción y consumo y presta servicios a distintas escalas de tiempo:

- **Calidad de potencia y estabilidad** (milisegundos a segundos): respuesta rápida ante perturbaciones de frecuencia o tensión. Supercondensadores y volantes.
- **Regulación y reservas** (segundos a minutos): baterías, volantes.
- **Desplazamiento de energía** *(energy shifting, arbitrage)* (horas): baterías, bombeo, CAES, LAES, almacenamiento térmico en centrales solares.
- **Estacional** (días a meses): hidrógeno y vectores, grandes embalses, almacenamiento térmico estacional.

1.2 Clasificación

Por la forma en que se guarda la energía: **mecánica** (bombeo, CAES, LAES, volantes), **térmica** (sensible, latente, termoquímica), **electroquímica** (baterías, baterías de flujo), **eléctrica** (supercondensadores, superconductores) y **química** (hidrógeno y combustibles sintéticos).

1.3 Parámetros para comparar

- **Capacidad** (MWh) y **potencia** (MW); su cociente es la **duración** (h).
- **Densidad de energía** (Wh/kg, Wh/L) y **densidad de potencia** (W/kg).
- **Rendimiento de ciclo** *(round-trip efficiency)*: energía devuelta entre energía cargada.
- **Autodescarga**, **tiempo de respuesta**, **número de ciclos** y **vida**.
- **Madurez** (TRL) y potencia instalada en el mundo. El bombeo hidráulico es, con mucha diferencia, la tecnología con más capacidad instalada; los supercondensadores, de las que menos.

1.4 Coste normalizado del almacenamiento (LCOS)

$$LCOS = \frac{\sum_t \frac{CAPEX_t + O\&M_t + C_{carga,t}}{(1+i)^t}}{\sum_t \frac{E_{descargada,t}}{(1+i)^t}} \qquad [€/\text{MWh}]$$

Incluye la inversión, la operación y mantenimiento y el coste de la energía de carga (dividido por el rendimiento). Sube si la electricidad de carga es más cara y baja con más ciclos al año.

2 Almacenamiento térmico

2.1 Calor sensible

Se calienta un material sin cambio de fase: $Q = m\, c_p\, \Delta T$. Materiales según la temperatura:

- **Agua** (hasta unos 100 °C a presión atmosférica): barata, c_p alto; calefacción, ACS, redes de calor.
- **Sales fundidas** (mezcla nitratos de sodio y potasio, "sal solar"): entre unos 290 y 565 °C; límite inferior por solidificación (por encima de unos 220 °C) y superior por descomposición. Sistema de dos tanques, caliente y frío, en centrales termosolares.
- **Aceite térmico**, **hormigón**, **rocas y cerámicas** (lechos empaquetados con termoclina en un solo tanque).

Ventaja: tecnología madura y barata. Inconveniente: la temperatura cambia durante la descarga y la densidad energética es moderada.

2.2 Calor latente: materiales de cambio de fase (PCM)

Se aprovecha el calor de fusión: casi toda la energía se intercambia a temperatura constante. Requisitos de un PCM: temperatura de cambio de fase adecuada a la aplicación, calor latente alto, buena conductividad térmica, cambio de volumen pequeño, ciclos reversibles sin subenfriamiento *(supercooling)*, estabilidad a largo plazo y compatibilidad con el contenedor. Familias: parafinas y orgánicos (baja temperatura), sales hidratadas, sales y eutécticos (media y alta), metales.

> **Ventaja clave del latente**
>
> Carga y descarga son prácticamente isotermas. Por eso el latente (y el termoquímico) encaja con la generación directa de vapor en centrales solares, donde el agua también cambia de fase a temperatura constante.

Su gran problema es la **baja conductividad térmica**: se mejora con aletas metálicas o de grafito, espumas metálicas, compuestos con grafito, cepillos de carbono o encapsulado. Además, un PCM no da una potencia de descarga constante: a medida que solidifica crece la capa sólida que hace de aislante, y eso lo hace poco adecuado para alimentar un ciclo de potencia directamente.

2.3 Almacenamiento termoquímico

Se usa el calor de una reacción reversible $AB + \Delta H \rightleftharpoons A + B$: al cargar se aporta calor y se separan los productos; al descargar se recombinan y liberan el calor. La temperatura de equilibrio T^* se da cuando $\Delta G = \Delta H - T\Delta S = 0$. Ejemplos: hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2 \rightleftharpoons CaO + H_2O$), hidruro de magnesio ($MgH_2 \rightleftharpoons Mg + H_2$), óxidos de cobalto, amoniaco y reformado de metano. Ventajas: la **mayor densidad energética** de los térmicos y almacenamiento prácticamente sin pérdidas a largo plazo (los productos se guardan por separado a temperatura ambiente). Inconveniente: menor madurez.

3 Aire comprimido (CAES)

3.1 Fundamento

Se comprime aire con electricidad barata y se guarda (cavernas de sal, acuíferos, depósitos); para recuperar la energía se expande en una turbina. Se basa en el intercambio de energía interna de un fluido. Plantas históricas: Huntorf (Alemania, 1978) y McIntosh (Estados Unidos, 1991).

3.2 Tipos

- **Diabático**: el calor de compresión se pierde y en la expansión se quema gas natural para recalentar el aire. Rendimiento de ciclo bajo (40–55 %). También se clasifica así el que recupera calor de un proceso externo.
- **Adiabático** (A-CAES): el calor de compresión se guarda en un almacenamiento térmico y se devuelve en la expansión; sin combustible y con mejor rendimiento (hasta un 70 % en diseño).
- **Isotermo**: compresión y expansión casi isotermas (intercambio de calor continuo); en desarrollo.
- Según el depósito: **isócoro** (volumen constante, la presión varía) e **isóbaro** (presión constante, por ejemplo con columna de agua).
- **Mini-CAES**: depósitos fabricados, de menor tamaño; su gran ventaja es que se pueden instalar en muchos más sitios porque no dependen de la geología.

3.3 Compresión por etapas

Trabajo específico ideal:

$$w_{iso} = RT \ln \frac{p_2}{p_1}, \qquad w_{ad} = c_p T_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right].$$

Comprimir en varias etapas con refrigeración intermedia *(intercooling)* se acerca a la compresión isoterma: consume menos trabajo específico y la temperatura de salida de cada etapa es menor.

4 Aire líquido (LAES)

Se licúa aire (unos −195 °C) con un ciclo de refrigeración, se guarda en tanques criogénicos a baja presión y para descargar se bombea, se evapora y se expande en una turbina. El frío de la evaporación se almacena y se reutiliza en la siguiente licuación, y el calor de compresión se aprovecha en la expansión; también se puede integrar calor residual. Ventajas: no depende de la geología, densidad energética mayor que el CAES y componentes industriales conocidos. Rendimiento de ciclo moderado (50–60 %).

5 Baterías

5.1 Funcionamiento

Dos electrodos unidos por un electrolito conductor iónico: al conectar el circuito, los electrones fluyen del potencial químico más negativo al más positivo por fuera y los iones se mueven por el electrolito para mantener el equilibrio de carga.

5.2 Tecnologías

Tecnología	Tensión de celda	Rasgos
Plomo-ácido	2 V	La más antigua (1859), barata y reciclable. Baja densidad y pocos ciclos; forma sulfato de plomo en carga y descarga; con sobrecarga ($> 2{,}39$ V) descompone el agua y requiere mantenimiento. No usa carbono como material fundamental.
Ion-litio	≈ 4 V	Grafito en el ánodo y óxidos metálicos (NMC, LFP...) en el cátodo. Alta densidad de energía y de potencia, buen rendimiento, mayor TRL de las electroquímicas de red. Riesgo de **embalamiento térmico**, que puede iniciarse por sobretensión en la carga.
Ion-sodio	algo menor	Sodio abundante y más barato a largo plazo; menor densidad de potencia y de energía que el litio.
Sodio-azufre (NaS)	2,08 V	Alta temperatura (unos 300 °C); la tensión cae mucho con la tasa de descarga.
Flujo de vanadio	1,26 V	Energía en electrolitos en tanques externos: potencia y energía se dimensionan por separado. El mayor número de ciclos y larga vida; baja densidad.

5.3 Conceptos de operación

- **Capacidad** (Ah) y energía $E = V \cdot Ah$. **Estado de carga** (SOC) y **profundidad de descarga** (DoD).
- **Tasa C**: $1C$ descarga la batería en una hora. A más tasa, más caída de tensión y menos energía útil.
- **Degradación**: por ciclos y por calendario; depende de DoD, temperatura y tasa. Fin de vida al llegar al 70–80 % de la capacidad inicial (SOH).
- **Sistema de gestión** (BMS): equilibrado de celdas, protecciones, estimación del SOC.

6 Volantes de inercia

Energía cinética de un cuerpo que gira: $E = \frac{1}{2} I\omega^2$. Para un cilindro macizo $I = \frac{1}{2} mr^2$, así que $E = \frac{1}{4} mv^2$ con $v = r\omega$ la velocidad periférica. La tensión máxima del material limita la velocidad:

$$\sigma_{max} = \frac{3+\nu}{8}\,\rho v^2 \;\Rightarrow\; \frac{E}{m} = K_s\,\frac{\sigma_{max}}{\rho}, \qquad K_s \approx 0{,}606 \text{ (cilindro macizo, } \nu = 0{,}3).$$

Lo que importa es la **resistencia específica** σ/ρ: los compuestos de fibra de carbono almacenan varias veces más energía por kilo que el acero. Volantes de alta velocidad con rodamientos magnéticos en vacío. Respuesta muy rápida, muchísimos ciclos, alta potencia, pero autodescarga alta: sirven para segundos o minutos (regulación de frecuencia, SAI, tracción).

7 Supercondensadores

Dos electrodos de muy gran superficie (carbón activo, geles de carbono, nanotubos; también óxidos metálicos que añaden reacciones redox, y polímeros conductores) separados por un electrolito, formando una doble capa eléctrica:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d}, \qquad E = \tfrac{1}{2} CV^2, \qquad P_{max} = \frac{V^2}{4R_s}.$$

La tensión de celda es baja (unos 2,7 V): se conectan en serie. Altísima densidad de potencia, respuesta más rápida que cualquier batería, cientos de miles de ciclos, pero poca energía. Si se descargan hasta la mitad de la tensión se aprovecha el 75 % de la energía.

8 Hidrógeno y vectores energéticos

El hidrógeno renovable se produce por electrólisis con electricidad renovable y puede almacenarse (comprimido, licuado, en cavernas o en portadores como amoniaco y LOHC) para usarse en industria, transporte o generación. Es la opción para almacenamiento estacional y para sectores difíciles de electrificar, con un rendimiento de ciclo eléctrico bajo (30–40 %). Marco: Pacto Verde Europeo, Fit for 55 y REPowerEU, con el objetivo europeo de producir 10 millones de toneladas de hidrógeno renovable e importar otros 10 en 2030; en 2022 el hidrógeno era menos del 2 % de la energía consumida en Europa y el 96 % se producía con gas natural.

9 Tabla comparativa

Tecnología	Rendimiento	Respuesta	Ciclos	Escala típica
Bombeo hidráulico	70–85 %	minutos	muy alto	horas a días
CAES diab. / adiab.	40–55 / $\leq$70 %	minutos	alto	horas
LAES	50–60 %	minutos	alto	horas
Ion-litio	85–95 %	ms	3000–8000	minutos a 4 h
Flujo de vanadio	65–80 %	ms	$>$ 10000	horas
Plomo-ácido	70–80 %	ms	500–2000	horas
Volante	85–95 %	ms	$> 10^5$	segundos a minutos
Supercondensador	90–98 %	μs–ms	$> 10^5$	segundos
Térmico sensible (sales)	90–98 % (térmico)	minutos	alto	horas
Hidrógeno	30–40 %	s–min	según equipo	días a meses

Rangos orientativos de la literatura técnica para comparar órdenes de magnitud; cada fuente da valores algo distintos.

10 Ideas que se suelen confundir

- "Varias etapas de compresión dan más rendimiento de ciclo": lo correcto es que consumen *menos trabajo específico* y la temperatura de salida es menor.
- "El PCM no sirve para un ciclo de potencia por su baja densidad": la razón es que *no da una potencia de descarga constante*.
- "El LCOS se mide en €/MW": se mide en €/MWh e incluye la inversión.
- "La ventaja del mini-CAES es trabajar a menor presión": la ventaja es *poder instalarse en muchos más sitios*.
- "El sodio es más escaso que el litio": al revés; la desventaja del ion-sodio es su menor densidad de potencia.
- "La batería más rápida ante una inestabilidad es la de litio": el supercondensador responde antes.