Apuntes

Energy Storage

Tema 1: Fundamentos y viabilidad económica

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.

Índice general

1 Por qué almacenar **2**

2 Balance económico **2**

3 Eficiencia round-trip **3**

4 TRL y aplicaciones **3**

5 Servicios y requisitos del almacenamiento **4**

6 Parámetros característicos **4**

7 Más sobre el coste nivelado **5**

1 Por qué almacenar

El almacenamiento desacopla generación y demanda. Permite absorber excedentes de renovables no gestionables, desplazar energía a horas de precio alto, dar servicios de red (frecuencia, tensión, reserva) y reducir la potencia instalada necesaria. Según la forma de energía acumulada se distinguen: mecánica (bombeo, aire comprimido, volantes), térmica (sensible, latente, termoquímica), eléctrica (supercondensadores), electroquímica (baterías) y química (hidrógeno y vectores).

2 Balance económico

Fórmulas clave

$$\eta_{st} = \frac{E_{des}}{E_{car}} \qquad B_{st} = E_{des}\,P_{des} - E_{car}\,P_{car}$$

$$E_{des,n} = n_{FEC}\,E_{sto} = t_n\,W_{des}$$

$$\text{LCOS [€/MWh]} = \frac{\text{CAPEX} + \sum_{n=1}^{N} \frac{\text{OPEX}_n + C_{car,n}}{(1+r)^n} + \frac{C_{EOL}}{(1+r)^N}}{\sum_{n=1}^{N} \frac{E_{des,n}}{(1+r)^n}}$$

- n_{FEC} son los ciclos equivalentes completos anuales y t_n las horas anuales equivalentes a plena potencia.
- Si la carga procede de excedentes, $P_{car} \approx 0$ y desaparece el término de carga. En otro caso, $C_{car,n} = E_{des,n}\,P_{car}/\eta_{RT}$.
- Si OPEX_n y $E_{des,n}$ son constantes, $\sum(1+r)^{-n} = \dfrac{1-(1+r)^{-N}}{r}$ (factor de anualidad).
- El LCOS baja al aumentar el uso (ciclos/año): el CAPEX se reparte entre más energía. La viabilidad depende del diferencial de precios entre carga y descarga.

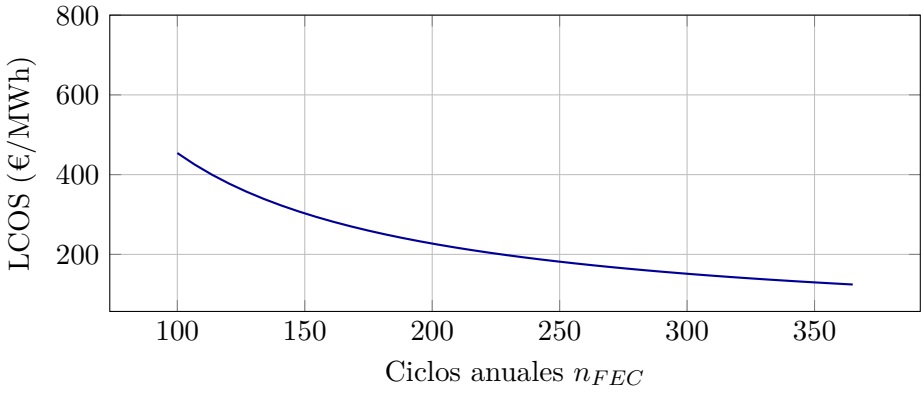


Figura 1. LCOS en función del uso (datos del problema 1, sin coste de carga).

3 Eficiencia round-trip

Fórmulas clave

$$\eta_{RT} = \frac{E_{des}}{E_{car}} = \prod_i \eta_i$$

Cada transformación introduce irreversibilidades: electroquímicas (transporte de iones y electrones), turbomáquinas (rendimiento isentrópico), pérdidas de calor y pérdidas de almacenamiento (aislamiento, autodescarga). El rendimiento global es el producto de los de cada etapa.

Tecnología	η_{RT} (%)	TRL	Coste capacidad ($/MWh)
Hidráulica de bombeo	82–94	9	165
CAES en cavernas	55–70	8	105
LAES	40–70	8	220
Volante de inercia	80–90	7	11520
Supercondensadores	82–93	8	74480
Batería ion-Li	75–93	8	469
Batería Pb-ácido	65–90	8	549
Batería redox de flujo	65–85	7	858
H_2 + pila de combustible	40–50	8	540
Power-to-Gas	30–44	5	300

Valores orientativos de los apuntes de la asignatura.

4 TRL y aplicaciones

- **TRL 9:** explotación comercial plena. **TRL 6:** demostrada a escala razonable en entorno pre-competitivo. Entre 6 y 9 la tecnología es madura, pero sin viabilidad técnico-económica clara en el mercado.
- Energía y potencia fijan la escala temporal: supercondensadores y volantes (segundos, μs–ms de respuesta; regulación de frecuencia y tensión), baterías (ms; horas), CAES y bombeo (horas a días), H_2 y power-to-gas (días a estaciones).

Tecnología	Respuesta	Capacidad	Potencia
Bombeo	segundos	días	MW
CAES	minutos	horas	MW
Volante / supercondensador	ms / μs	segundos	kW
Baterías (ion-Li, Pb, flujo)	ms	horas	kW–MW
H_2 (pila)	segundos	días	MW
Power-to-Gas	minutos	meses	GW

Idea clave

Cuanto mayor es la relación energía/potencia, más adecuada es la tecnología para almacenamiento de larga duración. La eficiencia baja el beneficio porque el coste de la energía de carga entra en OPEX.

5 Servicios y requisitos del almacenamiento

Un mismo sistema puede apilar varios servicios (*value stacking*), pero cada uno impone requisitos distintos de duración, potencia y número de ciclos.

Servicio	Duración típica	Ciclos/año	Tecnologías adecuadas
Regulación de frecuencia y tensión	s – min	muy altos	Supercondensadores, volantes, baterías
Reserva y seguimiento de carga	min – 2 h	altos	Baterías, volantes
Arbitraje de energía	2 – 10 h	250 – 365	Baterías, CAES, bombeo, LAES
Capacidad firme / adecuación	4 – 12 h	bajos	Bombeo, CAES, LAES, baterías
Integración de renovables (rampas)	min – h	altos	Baterías, volantes
Arranque autónomo (*black start*)	h	muy bajos	Baterías, H_2
Almacenamiento estacional	semanas – meses	1 – 3	H_2, power-to-gas, TES, termoquímico

6 Parámetros característicos

Definiciones

$$\text{Relación energía/potencia: } \frac{E_{sto}}{W_{des}} = t_{des}\ [\text{h}] \qquad \text{C-rate: } C_{rate} = \frac{I}{Q_{nom}} = \frac{1}{t_{des}}$$

$$\text{Profundidad de descarga: } DoD = \frac{E_{des}}{E_{nom}} \qquad \text{Autodescarga: } E(t) = E_0(1-a)^t$$

$$\text{Energía útil: } E_{util} = E_{nom} \cdot DoD \cdot SoH$$

- **Densidad de energía** (Wh/kg, Wh/L) y **densidad de potencia** (W/kg, W/L). Se comparan en un diagrama de Ragone: los supercondensadores y volantes están arriba a la izquierda (mucha potencia, poca energía), las baterías en el centro y el hidrógeno o los combustibles abajo a la derecha (mucha energía, poca potencia).
- **Vida útil:** depende de los ciclos (degradación por uso) y del tiempo (envejecimiento calendario). Una batería se da por agotada al llegar al 80 % de su capacidad inicial ($SoH = 0{,}8$).
- **Potencia y energía son independientes** en baterías de flujo, CAES, LAES, TES e hidrógeno (se dimensionan por separado: equipos de conversión por un lado y depósito por otro). En baterías convencionales y supercondensadores están acoplados.

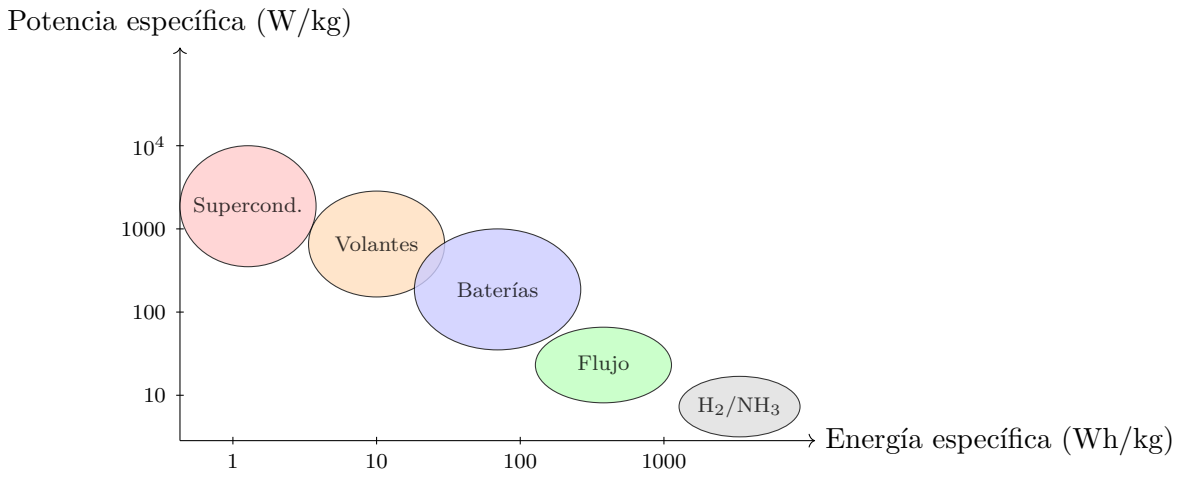


Figura 2. Diagrama de Ragone esquemático (posiciones cualitativas, no a escala).

7 Más sobre el coste nivelado

LCOS simplificado con factor de recuperación del capital

$$CRF = \frac{r(1+r)^N}{(1+r)^N - 1} \qquad \text{LCOS} \approx \frac{\text{CAPEX} \cdot CRF + \text{OPEX}}{E_{des,n}} + \frac{P_{car}}{\eta_{RT}}$$

La expresión simplificada ignora el coste de desmantelamiento y supone producción constante. Con los datos del problema 1, $CRF = 0{,}0872$ y el LCOS sin carga es 149,6 €/MWh, frente a 151,4 €/MWh del cálculo completo. La diferencia es el C_{EOL}.

- **Sensibilidad:** el LCOS es muy sensible al número de ciclos ($\propto 1/n_{FEC}$ en el término de capital), a la tasa de descuento y al precio de carga dividido entre η_{RT}. Una mejora de rendimiento reduce el término de carga.
- **Coste en dos partes:** el CAPEX se descompone en coste de potencia (€/kW: convertidores, turbinas, pila) y coste de energía (€/kWh: medio de almacenamiento). Para duraciones largas domina el coste de energía; para duraciones cortas, el de potencia. Por eso el hidrógeno y el aire comprimido compiten en larga duración, y las baterías de ion-litio en 1–4 h.
- **Reposición:** si la vida útil es menor que N, hay que añadir el coste de reposición descontado (p. ej. cambio de celdas en el año 10).

Revisar

En la tabla de costes de la asignatura las unidades de “capacidad” aparecen como $/MWh y las de “instalación” como $/kW. Con esas cifras (p. ej. 469 para ion-litio) el orden de magnitud sólo cuadra si son $/kWh. Confirmar las unidades antes de usarlas en un cálculo numérico.