Ejercicios resueltos

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

Problema 1. Tanques de sales fundidas de una central de torre 2
Problema 2. Agua frente a un material de cambio de fase 2
Problema 3. Compresión del aire en un CAES 3
Problema 4. Dimensionar una batería de ion-litio 3
Problema 5. Volante de inercia: compuesto frente a acero 4
Problema 6. Módulo de supercondensadores 4
Problema 7. Coste normalizado de una batería (LCOS) 5

Tabla de resultados **5**

Resumen

Siete problemas originales de dimensionamiento, uno por tecnología, con datos inventados y redondeados. Sirven para fijar órdenes de magnitud, que es lo que más ayuda en las preguntas conceptuales. Cifras calculadas con Python.

Problema 1. Tanques de sales fundidas de una central de torre

Enunciado

Una central termosolar de 50 MWe con un ciclo de rendimiento 0,38 quiere 7,5 horas de almacenamiento a plena carga. Las sales trabajan entre 290 y 565 °C con $c_p = 1{,}5\,\mathrm{kJ/(kg\,K)}$ y densidad $1800\,\mathrm{kg/m^3}$. Calcula la energía térmica, la masa de sales y el volumen de cada tanque.

$$Q = \frac{50}{0{,}38}\cdot 7{,}5 = 987\,\mathrm{MWh_t}$$

$$m = \frac{987\cdot 3{,}6\cdot 10^6\ \mathrm{kJ}}{1{,}5\cdot(565-290)} = \boxed{8612\,\mathrm{t}} \qquad V = \frac{8612\cdot 10^3}{1800} = \boxed{4785\,\mathrm{m^3}}$$

Cada tanque debe poder alojar toda la sal (más un margen), porque en carga completa está toda en el caliente. Con el salto térmico menor de un cilindroparabólico (unos 100 K) haría falta casi el triple de sal.

Problema 2. Agua frente a un material de cambio de fase

Enunciado

Para ACS entre 40 y 70 °C se compara agua ($c_p = 4{,}18$) con un PCM que funde a 58 °C ($L = 230\,\mathrm{kJ/kg}$, $c_p = 2\,\mathrm{kJ/(kg\,K)}$ en sólido y en líquido). ¿Cuánta energía guarda cada kilo?

$$q_{agua} = 4{,}18\cdot 30 = 125{,}4\,\mathrm{kJ/kg}$$

$$q_{PCM} = 2\,(58-40) + 230 + 2\,(70-58) = \boxed{290\,\mathrm{kJ/kg}}$$

El PCM guarda 2,3 veces más por kilo y casi toda la energía a 58 °C. A cambio, cuesta más, conduce peor el calor y su potencia de descarga cae cuando solidifica.

Problema 3. Compresión del aire en un CAES

Enunciado

Se comprime aire de 1 a 70 bar desde 20 °C ($R = 0{,}287\,\text{kJ/(kg K)}$, $c_p = 1{,}005$, $k = 1{,}4$). Compara el trabajo específico isotermo, adiabático en una etapa y adiabático en tres etapas iguales con refrigeración intermedia hasta 20 °C.

$$w_{iso} = 0{,}287 \cdot 293{,}15 \cdot \ln 70 = \boxed{357\,\text{kJ/kg}}$$

$$w_1 = 1{,}005 \cdot 293{,}15\,(70^{0{,}286} - 1) = 697\,\text{kJ/kg} \qquad T_{sal} = 714\,^\circ\text{C}$$

$$r = 70^{1/3} = 4{,}12 \qquad w_3 = 3 \cdot 1{,}005 \cdot 293{,}15\,(4{,}12^{0{,}286} - 1) = \boxed{441\,\text{kJ/kg}} \qquad T_{sal} = 166\,^\circ\text{C}$$

Con tres etapas el trabajo baja un 37 % y la temperatura de salida de cada etapa pasa de 714 °C a 166 °C. En un CAES adiabático ese calor se guarda para devolverlo en la expansión.

Problema 4. Dimensionar una batería de ion-litio

Enunciado

Una planta fotovoltaica quiere entregar 2 MW durante 4 horas por la tarde. La batería trabaja con una profundidad de descarga del 90 % y debe cumplir al final de su vida, cuando conserve el 80 % de la capacidad. Celdas LFP de 3,2 V y 280 Ah. Calcula la capacidad nominal, el número de celdas y la tasa C.

$$E_{\text{útil}} = 2 \cdot 4 = 8\,\text{MWh} \qquad E_{nom} = \frac{8}{0{,}9 \cdot 0{,}8} = \boxed{11{,}1\,\text{MWh}}$$

$$E_{celda} = 3{,}2 \cdot 280 = 896\,\text{Wh} \qquad N = \frac{11{,}1 \cdot 10^6}{896} = \boxed{12\,401\ \text{celdas}} \qquad C = \frac{2}{11{,}1} = 0{,}18C$$

La batería se sobredimensiona un 39 % para cubrir la profundidad de descarga y la degradación. Las celdas se agrupan en serie hasta la tensión del inversor y en paralelo hasta la capacidad.

Problema 5. Volante de inercia: compuesto frente a acero

Enunciado

Un rotor macizo de fibra de carbono admite 800 MPa con densidad 1600 kg/m^3; uno de acero, 600 MPa y 7850 kg/m^3 ($\nu = 0{,}3$). Calcula la velocidad periférica máxima y la energía específica, y la energía de un rotor de compuesto de 500 kg.

$$v_{max} = \sqrt{\frac{8\sigma}{(3+\nu)\rho}}: \qquad \text{compuesto } 1101\,\text{m/s}, \quad \text{acero } 430\,\text{m/s}$$

$$\frac{E}{m} = \frac{1}{4}v_{max}^2: \qquad \text{compuesto } \underline{84{,}2\,\text{Wh/kg}}, \quad \text{acero } 12{,}9\,\text{Wh/kg}$$

$$E_{500\,kg} = 500 \cdot 84{,}2 = \underline{42\,\text{kWh}}$$

La resistencia específica σ/ρ decide: el compuesto guarda 6,5 veces más energía por kilo.

Problema 6. Módulo de supercondensadores

Enunciado

Un módulo de 63 F y 125 V con resistencia serie de 18 mΩ se descarga hasta la mitad de su tensión. Calcula la energía total, la útil y la potencia máxima.

$$E = \tfrac{1}{2} \cdot 63 \cdot 125^2 = 492\,\text{kJ} = 137\,\text{Wh}$$

$$E_{\text{útil}} = \tfrac{1}{2} \cdot 63\,(125^2 - 62{,}5^2) = \underline{103\,\text{Wh}}\ (75\,\%)$$

$$P_{max} = \frac{125^2}{4 \cdot 0{,}018} = \underline{217\,\text{kW}}$$

Pocos vatios-hora pero cientos de kilovatios: es un elemento de potencia, no de energía.

Problema 7. Coste normalizado de una batería (LCOS)

Enunciado

La batería del problema 4 (8 MWh útiles) cuesta 300 €/kWh útil, su O&M anual es el 2 % de la inversión, dura 15 años con una tasa del 6 %, hace 330 ciclos al año al 90 % de la capacidad útil, carga a 50 €/MWh y su rendimiento es 0,88. Calcula el LCOS (simplificado con anualidad).

$$CAPEX = 8000 \cdot 300 = 2{,}4\,\text{M€} \qquad O\&M = 48\,\text{k€/año}$$

$$A = 2{,}4 \cdot \frac{0{,}06}{1 - 1{,}06^{-15}} = 247\,\text{k€/año}$$

$$E_{\text{año}} = 8 \cdot 0{,}9 \cdot 330 = 2376\,\text{MWh}$$

$$LCOS = \frac{247 + 48}{2376} \cdot 10^3 + \frac{50}{0{,}88} = 124{,}2 + 56{,}8 = \underline{181\,\text{€/MWh}}$$

Dos tercios del coste son inversión: hacer más ciclos al año es lo que más lo abarata. El arbitraje solo compensa si el diferencial de precios entre carga y descarga supera ese valor.

Tabla de resultados

Problema	Tecnología	Resultado principal
1	Térmico sensible	8612 t de sales, 4785 m^3
2	Latente	PCM 290 kJ/kg frente a 125 kJ/kg del agua
3	CAES	357 (isoterma), 697 (1 etapa) y 441 kJ/kg (3 etapas)
4	Ion-litio	11,1 MWh nominales, 12 401 celdas, 0,18C
5	Volante	84 Wh/kg (compuesto) frente a 13 Wh/kg (acero)
6	Supercondensador	103 Wh útiles, 217 kW
7	Economía	LCOS 181 €/MWh