Resoluciones paso a paso

Energy Storage

Tema 2: Almacenamiento térmico

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

Problema 1 – Dos tanques de sales fundidas

Se dimensiona un almacenamiento de sales de nitratos (290 °C fría, 565 °C caliente) de $E = 1000\,\mathrm{MWh_t}$. Datos: $c_p = 1{,}52\,\mathrm{kJ/(kg\,K)}$, $\rho = 1870\,\mathrm{kg/m^3}$. Calcule la masa de sal y el volumen que debe albergar cada tanque.

$\Delta T = 565 - 290 = 275\,\mathrm{K}$. $E = 1000 \cdot 3{,}6 \cdot 10^9 = 3{,}6 \cdot 10^{12}\,\mathrm{J}$.

$$m = \frac{E}{c_p\,\Delta T} = \frac{3{,}6 \cdot 10^{12}}{1520 \cdot 275} = \underline{8{,}61 \cdot 10^6\,\mathrm{kg}\ (8612\,\mathrm{t})} \qquad V = \frac{m}{\rho} = \frac{8{,}612 \cdot 10^6}{1870} = \underline{4606\,\mathrm{m^3}}$$

Cada tanque debe albergar todo el volumen: $4606\,\mathrm{m^3}$ (más margen de diseño).

Problema 2 – Tanque termoclino con relleno

Un termoclino almacena $E_{eff} = 1000\,\mathrm{MWh_t}$ entre 290 °C y 565 °C. Fluido: $\rho c_p = 1870 \cdot 1520\ \mathrm{J/(m^3K)}$; relleno sólido: $\rho = 2500\,\mathrm{kg/m^3}$, $c_p = 900\,\mathrm{J/(kg\,K)}$; porosidad $\epsilon = 0{,}25$. Las zonas de distribución fría y caliente suponen un 7,5 % del volumen efectivo cada una. Relación de aspecto $H_t/D_t = 1{,}8$. Calcule $\rho c_{p,eff}$, V_{eff}, V_t, D_t, H_t y el volumen de sólido ($V_{sol} = (1-\epsilon)(V_{eff} + V_{df})$).

Capacidad volumétrica efectiva:

$$\rho c_{p,eff} = 1870 \cdot 1520 \cdot 0{,}25 + 2500 \cdot 900 \cdot 0{,}75 = 710\,600 + 1\,687\,500 = \underline{2{,}398 \cdot 10^6\ \mathrm{J/(m^3K)}}$$

$$V_{eff} = \frac{3{,}6 \cdot 10^{12}}{2{,}398 \cdot 10^6 \cdot 275} = \underline{5459\,\mathrm{m^3}} \qquad V_t = V_{eff}(1 + 0{,}075 + 0{,}075) = \underline{6278\,\mathrm{m^3}}$$

Dimensiones: $V_t = \dfrac{\pi D_t^2}{4} \cdot 1{,}8 D_t \Rightarrow D_t = \left(\dfrac{4 \cdot 6278}{1{,}8\pi}\right)^{1/3} = \underline{16{,}4\,\mathrm{m}}$, $H_t = 1{,}8 \cdot 16{,}44 = \underline{29{,}6\,\mathrm{m}}$.

Sólido: $V_{sol} = 0{,}75 \cdot (5459 + 0{,}075 \cdot 5459) = \underline{4401\,\mathrm{m^3}}$.

Problema 3 – Calor sensible frente a latente

Un material de cambio de fase (datos hipotéticos) tiene $L = 170\,\mathrm{kJ/kg}$ y $c_p = 2{,}0\,\mathrm{kJ/(kg\,K)}$ en ambas fases. Se carga con un salto sensible de 30 K más el cambio de fase. Calcule la masa necesaria para $100\,\mathrm{MWh_t}$, la densidad energética en Wh/kg y compárela con la sal del problema 1 (salto de 275 K).

Energía específica $= L + c_p \Delta T = 170 + 2{,}0 \cdot 30 = 230\,\mathrm{kJ/kg} = \underline{63{,}9\,\mathrm{Wh/kg}}$.

$m = \dfrac{100 \cdot 3{,}6 \cdot 10^9}{230\,000} = \underline{1{,}565 \cdot 10^6\,\mathrm{kg}}$.

Sal: $c_p \Delta T = 1520 \cdot 275 = 418\,\mathrm{kJ/kg} = 116{,}1\,\mathrm{Wh/kg}$, es decir, $m = 8{,}61 \cdot 10^5\,\mathrm{kg}$ para $100\,\mathrm{MWh_t}$. Con estos datos la sal (salto de 275 K) almacena casi el doble por kg. El PCM compensa si se necesita un rango de temperatura muy estrecho.

Problema 4 – Almacenamiento en una central termosolar

Una central CSP de $P_e = 50\,\mathrm{MW_e}$ con rendimiento del bloque de potencia $\eta = 0{,}38$ requiere 7,5 h de almacenamiento a plena carga. Calcule la potencia térmica del bloque, la energía a almacenar, la masa de sales (mismos datos del problema 1) y la potencia pico del campo solar si el múltiplo solar es $SM = 2{,}0$.

Potencia térmica del bloque: $P_{th} = 50/0{,}38 = \underline{131{,}6\,\mathrm{MW_t}}$.

Energía: $E = 131{,}6 \cdot 7{,}5 = \boxed{986{,}8\,\mathrm{MWh_t}}$.

Masa: $m = \dfrac{986{,}8 \cdot 3{,}6 \cdot 10^9}{1520 \cdot 275} = \boxed{8{,}50 \cdot 10^6\,\mathrm{kg}}$.

Campo solar: $P_{campo} = SM \cdot P_{th} = 2{,}0 \cdot 131{,}6 = \boxed{263{,}2\,\mathrm{MW_t}}$.

Problema 5 – Pérdidas del tanque caliente

Un tanque cilíndrico de sales ($D = H = 18\,\mathrm{m}$) contiene sal a $565\,^\circ\mathrm{C}$ ($\rho = 1870\,\mathrm{kg/m^3}$, $c_p = 1{,}52\,\mathrm{kJ/(kg\,K)}$). Se considera la superficie lateral y la tapa, con $U = 0{,}4\,\mathrm{W/(m^2K)}$ y $T_{amb} = 25\,^\circ\mathrm{C}$. Calcule la potencia perdida, la energía perdida en un día, el descenso de temperatura diario y el porcentaje de la energía almacenada (sobre 275 K).

$A = \pi DH + \pi D^2/4 = \pi \cdot 18 \cdot 18 + \pi \cdot 18^2/4 = 1018 + 254 = 1272\,\mathrm{m^2}$.

$\dot{Q} = UA\Delta T = 0{,}4 \cdot 1272 \cdot (565 - 25) = \boxed{274{,}8\,\mathrm{kW}}$; en un día: $274{,}8 \cdot 24 = \boxed{6{,}60\,\mathrm{MWh_t}}$.

$V = \pi \cdot 18^2 \cdot 18/4 = 4580\,\mathrm{m^3}$, $m = 8{,}565 \cdot 10^6$ kg; $\Delta T_{dia} = \dfrac{274\,827 \cdot 86\,400}{8{,}565 \cdot 10^6 \cdot 1520} = \boxed{1{,}82\,\mathrm{K}}$.

$E = m\,c_p \cdot 275 = 994{,}5\,\mathrm{MWh_t}$; pérdida diaria $= 6{,}60/994{,}5 = \boxed{0{,}66\,\%}$.

Problema 6 – Solidificación de un PCM

Un PCM ($k = 0{,}5\,\mathrm{W/(m\,K)}$, $\rho = 1900\,\mathrm{kg/m^3}$, $L = 170\,\mathrm{kJ/kg}$) se solidifica sobre una pared mantenida 10 K por debajo de T_m. Calcule el espesor de sólido tras 1 h y 4 h y la potencia por unidad de área al cabo de 1 h.

$$s(t) = \sqrt{\frac{2k\Delta T t}{\rho L}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0{,}5 \cdot 10 \cdot 3600}{1900 \cdot 170\,000}} = \boxed{10{,}6\,\mathrm{mm}}\ (1\ \mathrm{h})$$

A 4 h: $s = \sqrt{4} \cdot 10{,}6 = \boxed{21{,}1\,\mathrm{mm}}$. Potencia a 1 h: $\dot{q} = k\Delta T/s = 0{,}5 \cdot 10/0{,}01056 = \boxed{474\,\mathrm{W/m^2}}$.

Al cuadruplicar el tiempo el espesor sólo se duplica y la potencia se reduce a la mitad: la conductividad limita la descarga.