Resoluciones paso a paso

Energy Storage

Tema 3: Aire comprimido (CAES) y aire líquido (LAES)

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.

Problema 1 – Trabajo de compresión

Se comprime aire desde $P_0 = 1\,\text{bar}$ y $T_0 = 20\,^\circ\text{C}$ hasta $P_1 = 70\,\text{bar}$. Datos: $\gamma = 1{,}4$, $R_a = 287{,}058\,\text{J/(kg K)}$. Calcule (a) la temperatura final en compresión adiabática, (b) el trabajo específico adiabático y el isotermo, y (c) el ahorro porcentual de la compresión isoterma.

$\chi = (\gamma - 1)/\gamma = 0{,}2857$; $R_a T_0 = 287{,}058 \cdot 293{,}15 = 84\,151\,\text{J/kg}$.

(a) $T_1 = T_0\, r^{\chi} = 293{,}15 \cdot 70^{0{,}2857} = 293{,}15 \cdot 3{,}366 = \boxed{987\,\text{K}\ (714\,^\circ\text{C})}$.

(b)

$$w_{ad} = R_a T_0 \frac{r^{\chi} - 1}{\chi} = 84151 \cdot \frac{2{,}366}{0{,}2857} = \boxed{697\,\text{kJ/kg}}$$

$$w_{iso} = R_a T_0 \ln r = 84151 \cdot 4{,}2485 = \boxed{357{,}5\,\text{kJ/kg}}$$

(c) Ahorro $= 1 - 357{,}5/697 = \boxed{48{,}7\,\%}$. Por eso se usan etapas con *intercooling*.

Problema 2 – Exergía de una caverna

Una caverna de $V = 5 \cdot 10^5\,\text{m}^3$ almacena aire a $P_1 = 70\,\text{bar}$ y $T = T_0 = 20\,^\circ\text{C}$ (ambiente $P_0 = 1\,\text{bar}$). Calcule la masa de aire y la exergía mecánica almacenada en MWh.

$$m = \frac{P_1 V}{R_a T_0} = \frac{70 \cdot 10^5 \cdot 5 \cdot 10^5}{84151} = \boxed{4{,}16 \cdot 10^7\,\text{kg}}$$

$$Ex_{mec} = m\, R_a T_0 \ln \frac{P_1}{P_0} = P_1 V \ln 70 = 3{,}5 \cdot 10^{12} \cdot 4{,}2485 = 1{,}487 \cdot 10^{13}\,\text{J} = \boxed{4130\,\text{MWh}}$$

Problema 3 – Densidad de energía y volumen de depósito

Un depósito neumático opera entre $P_1 = 70\,\text{bar}$ y $P_{min} = 40\,\text{bar}$ con $P_0 = 1\,\text{bar}$ y $n = 1{,}4$. Calcule $E_{v,u}$ (MJ/m^3) y el volumen necesario para una capacidad de 100 MWh. Compare con el límite isotermo $E_v = P_1 \ln(P_1/P_0)$.

$$E_v(P) = \frac{n}{n-1} P \left[1 - \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

$E_v(70\ \text{bar}) = 3{,}5 \cdot 7 \cdot 10^6 \cdot (1 - 0{,}2971) = 17{,}22\,\text{MJ/m}^3$; $E_v(40\ \text{bar}) = 3{,}5 \cdot 4 \cdot 10^6 \cdot (1 - 0{,}3486) = 9{,}12\,\text{MJ/m}^3$.

$E_{v,u} = 17{,}22 - 9{,}12 = \boxed{8{,}10\,\text{MJ/m}^3}$ ($2{,}25\,\text{kWh/m}^3$).

$V = \dfrac{100 \cdot 3{,}6 \cdot 10^9}{8{,}10 \cdot 10^6} = \boxed{44\,400\,\text{m}^3}$.

Límite isotermo: $E_v = 70 \cdot 10^5 \ln 70 = 29{,}7\,\text{MJ/m}^3$ (la expansión adiabática aprovecha menos si no se recalienta).

Problema 4 – Planta LAES

Una planta LAES de $\eta_{RT} = 0{,}55$ y trabajo de licuación $w_{liq} = 270\,\text{Wh/kg}$ debe entregar 400 MWh. Calcule la masa de aire líquido, el volumen de tanque ($\rho_{liq} = 875\,\text{kg/m}^3$, dato externo) y el factor de mejora frente al ciclo Linde simple (2500 Wh/kg).

Energía específica recuperada: $0{,}55 \cdot 270 = 148{,}5\,\text{Wh/kg}$.

$m = \dfrac{400 \cdot 10^6}{148{,}5} = \boxed{2{,}69 \cdot 10^6\,\text{kg}}$; $V = \dfrac{2{,}69 \cdot 10^6}{875} = \boxed{3078\,\text{m}^3}$.

Mejora: $2500/270 = \boxed{9{,}3}$ veces menos trabajo de licuación.

Problema 5 – Compresión en tres etapas

Se comprime aire de 1 bar y 20 °C a 70 bar en $N = 3$ etapas iguales, con refrigeración intermedia hasta 20 °C. Calcule r_s, la temperatura de salida de cada etapa, el trabajo específico total y el ahorro frente a la compresión adiabática en una etapa y frente a la isoterma ideal.

$r_s = 70^{1/3} = \boxed{4{,}121}$. $T_{sal} = 293{,}15 \cdot 4{,}121^{0{,}2857} = \boxed{439{,}4\,\text{K}\ (166\,^\circ\text{C})}$.

Por etapa: $w_s = R_a T_0 \dfrac{r_s^{\chi} - 1}{\chi} = 84151 \cdot \dfrac{1{,}4987 - 1}{0{,}2857} = 146{,}9\,\text{kJ/kg}$; en total $w_3 = 3 \cdot 146{,}9 = \boxed{440{,}7\,\text{kJ/kg}}$.

Ahorro frente a una etapa adiabática: $1 - 440{,}7/697 = \boxed{36{,}8\,\%}$. Respecto a la isoterma ideal (357,5 kJ/kg) hay todavía un +23,3 %.

Problema 6 – Rendimiento de un CAES diabático

Un CAES consume $W_{ent} = 100\,\text{MWh}$ en carga y $Q_{comb} = 80\,\text{MWh}_\text{t}$ de gas en descarga, y entrega $W_{sal} = 75\,\text{MWh}$. Calcule el rendimiento contando el combustible como calor y como electricidad equivalente con $\eta_{ref} = 0{,}50$.

Como calor: $\eta = \dfrac{75}{100 + 80} = \boxed{41{,}7\,\%}$.

Con electricidad equivalente: $\eta_{eq} = \dfrac{75}{100 + 80 \cdot 0{,}5} = \boxed{53{,}6\,\%}$.

La segunda cifra es comparable con el 54 % de McIntosh, que es la forma de contar que usa la bibliografía para comparar con tecnologías sólo eléctricas.

Problema 7 – CAES frente a LAES

Compare la densidad energética del CAES del problema 3 (8,10 MJ/m^3) con la del LAES (200 Wh/L). ¿Qué volumen de LAES equivale al depósito de 44 400 m^3 del problema 3?

CAES: $8{,}10/3{,}6 = 2{,}25\,\text{kWh/m}^3 = 2{,}25\,\text{Wh/L}$. LAES: $200/2{,}25 = \boxed{89}$ veces más denso.

Energía del depósito: 100 MWh. Volumen LAES: $100 \cdot 10^6/200 = 5 \cdot 10^5\,\text{L} = \boxed{500\,\text{m}^3}$ (frente a 44 400 m^3). Se trata de volumen de líquido útil, sin contar tanques de calor y frío ni equipos.