Resoluciones paso a paso

Energy Storage

Tema 6: Hidrógeno, almacenamiento termoquímico y vectores

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 – Electrólisis del agua

Con $\Delta G^0 = 237{,}46\,\text{kJ/mol}$, $\Delta H^0 = 286{,}03\,\text{kJ/mol}$, $F = 96\,485\,\text{C/mol}$ y $M_{H_2} = 2{,}016\,\text{g/mol}$, calcule las tensiones reversible y termoneutra, la energía mínima por kg de H_2 para ambas, y la energía real por kg si el electrolizador funciona a 1,9 V (rendimiento de Faraday 1).

$\Delta V_{rev} = \dfrac{237\,460}{2 \cdot 96485} = \boxed{1{,}231\,\text{V}}$; $\Delta V_{tn} = \dfrac{286\,030}{2 \cdot 96485} = \boxed{1{,}482\,\text{V}}$.

$n = 1000/2{,}016 = 496{,}0$ mol. Mínimo con ΔG: $496{,}0 \cdot 237{,}46 = 117{,}8\,\text{MJ} = \boxed{32{,}7\,\text{kWh/kg}}$; con ΔH: $496{,}0 \cdot 286{,}03 = 141{,}9\,\text{MJ} = \boxed{39{,}4\,\text{kWh/kg}}$.

Real a 1,9 V: $E = nzFV = 496{,}0 \cdot 2 \cdot 96485 \cdot 1{,}9 = 181{,}9\,\text{MJ} = \boxed{50{,}5\,\text{kWh/kg}}$, con $\eta = 1{,}482/1{,}9 = 78\,\%$ (frente al PCS).

Problema 2 – Reformado de metano y color del hidrógeno

Para $CH_4 + 2H_2O \rightarrow 4H_2 + CO_2$ calcule los kg de CO_2 estequiométricos por kg de H_2. Si el ACV del reformado da $10\,\text{kgCO}_2/\text{kgH}_2$ y el umbral de bajo carbono es $4{,}3\,\text{kgCO}_2/\text{kgH}_2$, calcule la fracción de captura necesaria.

$\dfrac{m_{CO_2}}{m_{H_2}} = \dfrac{44{,}01}{4 \cdot 2{,}016} = \boxed{5{,}46\ \text{kg/kg}}$ (estequiométrico; el ACV es mayor por emisiones del proceso).

Captura necesaria: $1 - 4{,}3/10 = \boxed{57\,\%}$.

Problema 3 – Pirólisis de metano

Para $CH_4 \rightarrow C(s) + 2H_2$: $\Delta H = 74{,}5\,\text{kJ/mol}$; S^0: CH_4 186,2, H_2 130,68, C(s) 5,74 J/(mol K). Calcule ΔS, ΔG a 298 K, la temperatura de espontaneidad, y la masa de carbono sólido y energía térmica (en kWh) por kg de H_2.

$\Delta S = 2 \cdot 130{,}68 + 5{,}74 - 186{,}2 = \boxed{80{,}9\,\text{J/(mol K)}}$.

$\Delta G_{298} = 74{,}5 - 298{,}15 \cdot 0{,}0809 = \boxed{50{,}4\,\text{kJ/mol}}$ (no espontánea). $T = \Delta H/\Delta S = 74\,500/80{,}9 = \boxed{921\,\text{K}}$.

Por kg de H_2 (496 mol): 248 mol de C = $\boxed{2{,}98\,\text{kg C}}$; calor $= 248 \cdot 74{,}5 = 18{,}5\,\text{MJ} = \boxed{5{,}13\,\text{kWh}}$.

Revisar

Los apuntes usan $\Delta S = 0{,}186\,\text{kJ/(mol K)}$ (la entropía del CH_4) y obtienen $T = 400\,\text{K}$. La entropía de reacción correcta es 80,9 J/(mol K), que da ≈ 921 K.

Problema 4 – Vectores energéticos

Con densidades energéticas volumétricas de H_2 comprimido ($2{,}1\,\text{GJ/m}^3$), H_2 líquido ($8{,}54\,\text{GJ/m}^3$), NH_3 ($11{,}3\,\text{GJ/m}^3$) y gasolina ($31{,}07\,\text{GJ/m}^3$), calcule el volumen de cada uno para almacenar 1 GJ y la masa de NH_3 (PCI $18{,}8\,\text{MJ/kg}$). Verifique la densidad energética del NH_3 con $\rho = 602{,}8\,\text{kg/m}^3$.

H_2 comprimido: $\boxed{0{,}476\,\text{m}^3}$

H_2 líquido: $\boxed{0{,}117\,\text{m}^3}$

NH_3: $\boxed{0{,}0885\,\text{m}^3}$

gasolina: $\boxed{0{,}0322\,\text{m}^3}$

Masa de NH_3: $1000/18{,}8 =$ $53{,}2\,\text{kg}$. Comprobación: $18{,}8 \cdot 602{,}8 = 11\,333\,\text{MJ/m}^3 = 11{,}3\,\text{GJ/m}^3$ (coincide).

Problema 5 – Almacenamiento termoquímico

En $Mg(OH)_2 \rightleftharpoons MgO + H_2O$ se toma $\Delta H = 81\,\text{kJ/mol}$ (dato supuesto), $M = 58{,}32\,\text{g/mol}$ y $\rho = 2370\,\text{kg/m}^3$. Calcule la energía específica (Wh/kg) y volumétrica (MWh/m^3).

$e = \dfrac{81\,000}{0{,}05832} = 1{,}389 \cdot 10^6\,\text{J/kg} =$ $386\,\text{Wh/kg}$; $e_v = 1{,}389 \cdot 10^6 \cdot 2370 = 3{,}29 \cdot 10^9\,\text{J/m}^3 =$ $0{,}914\,\text{MWh/m}^3$.

Problema 6 – Eficiencia de pila y ciclo completo

Una pila de H_2 opera a $0{,}70\,\text{V}$ por celda. Calcule su rendimiento respecto al PCS ($\Delta H = 286{,}03\,\text{kJ/mol}$) y al PCI ($241{,}83\,\text{kJ/mol}$). Si la electrólisis opera a $1{,}9\,\text{V}$, calcule el rendimiento round-trip (base PCS) del par electrolizador + pila.

$\eta_{PCS} = \dfrac{0{,}70}{1{,}482} =$ $47{,}2\,\%$. $V_{PCI} = \dfrac{241\,830}{2 \cdot 96485} = 1{,}253\,\text{V}$, luego $\eta_{PCI} = 0{,}70/1{,}253 =$ $55{,}9\,\%$.

Electrólisis: $\eta_E = 1{,}482/1{,}9 = 0{,}780$. Round-trip: $0{,}780 \cdot 0{,}472 =$ $36{,}8\,\%$ (base PCS; sin compresión).

Problema 7 – Compresión de hidrógeno

Calcule el trabajo isotermo para comprimir H_2 de $30\,\text{bar}$ a $700\,\text{bar}$ a $298{,}15\,\text{K}$ (gas ideal, $R/M = 4124\,\text{J/(kg K)}$) en kWh/kg y como porcentaje del PCS ($39{,}4\,\text{kWh/kg}$).

$w = 4124 \cdot 298{,}15 \cdot \ln\dfrac{700}{30} = 1{,}2296 \cdot 10^6 \cdot 3{,}150 = 3{,}873\,\text{MJ/kg} =$ $1{,}076\,\text{kWh/kg}$.

Respecto al PCS: $1{,}076/39{,}4 =$ $2{,}7\,\%$. Con compresión adiabática por etapas y rendimientos reales la cifra sube; el isotermo es el mínimo.

Problema 8 – Balance de masa y energía del amoníaco

Calcule los kg de NH_3 que se obtienen por kg de H_2, la energía (PCI) contenida y el porcentaje respecto al H_2 de partida (PCI $120{,}1\,\text{MJ/kg}$).

$\dfrac{m_{NH_3}}{m_{H_2}} = \dfrac{2 \cdot 17{,}03}{3 \cdot 2{,}016} =$ $5{,}63\,\text{kg/kg}$.

Energía: $5{,}63 \cdot 18{,}8 =$ $105{,}9\,\text{MJ}$; porcentaje: $105{,}9/120{,}1 =$ $88\,\%$ (sin energía de proceso).