Apuntes

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.

Índice general

1 Almacenamiento termoquímico **2**

2 Hidrógeno: producción **2**
2.1 Electrólisis . . . 2
2.2 Reformado y pirólisis . . . 3
2.3 Colores . . . 3

3 Vectores energéticos **3**

4 Tecnologías de electrolizador **4**

5 Pila de combustible **4**

6 Almacenamiento de hidrógeno **5**

7 Ruta del amoníaco: balance energético **5**

8 Termoquímico: más detalle **5**

1 Almacenamiento termoquímico

Se acumula energía en el calor de una reacción reversible (carga endotérmica, descarga exotérmica). El material puede almacenarse sin pérdidas mientras los reactivos estén separados, lo que lo hace adecuado para almacenamiento estacional. Puede basarse en sorción (absorción/adsorción) o en reacciones químicas.

$$\mathrm{MgO} + \mathrm{H_2O} \rightleftharpoons \mathrm{Mg(OH)_2} + \Delta H_r \qquad A(s) + x\mathrm{H_2O}(g) \leftrightarrow A \cdot x\mathrm{H_2O}(s) + \Delta_{ads}H$$

Tipo	Reacción	Rango (°C)
Hidratos de sales	$\mathrm{CuSO_4 \cdot 5H_2O \rightleftharpoons CuSO_4 \cdot H_2O + 4H_2O}$	120–160
Hidróxidos	$\mathrm{Mg(OH)_2 \rightleftharpoons MgO + H_2O}$	250–350
Hidróxidos	$\mathrm{Ca(OH)_2 \rightleftharpoons CaO + H_2O}$	450–550
Carbonatos	$\mathrm{MgCO_3 \rightleftharpoons MgO + CO_2}$	350–450
Carbonatos	$\mathrm{CaCO_3 \rightleftharpoons CaO + CO_2}$	850–950
Amoniacatos	$\mathrm{CaCl_2 \cdot 8NH_3 \rightleftharpoons CaCl_2 \cdot 4NH_3 + 4NH_3}$	25–100

Energía específica: $e = \Delta H_r / M$ (por kg de reactivo) y volumétrica $e_v = e\,\rho$.

2 Hidrógeno: producción

2.1 Electrólisis

Fórmulas clave

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0 \qquad \Delta V_{rev} = \frac{\Delta G^0}{nF}, \quad \Delta V_{tn} = \frac{\Delta H^0}{nF} \quad (n = 2,\ F = 96\,485\ \mathrm{C/mol})$$

$$\Delta V_{rev} = 1{,}23\ \mathrm{V} \qquad \Delta V_{tn} = 1{,}48\ \mathrm{V} \qquad \eta_E = \frac{m_{H_2}\, PCS}{I\, V\, t}$$

- Mínimo termodinámico $\approx 33\,\mathrm{kWh/kg}$ (ΔG) o $\approx 39{,}4\,\mathrm{kWh/kg}$ (ΔH). En la práctica 50–55 kWh/kg.
- Sobrepotencial: baja conductividad del agua y energía de activación. Se mitiga con electrolito alcalino y electrocatalizadores.
- Eficiencia de Faraday: moles de $\mathrm{H_2}$ por carga transferida ($\approx 100\,\%$). A alta temperatura (vapor) baja el consumo eléctrico, porque parte de la energía entra como calor.
- La pila de combustible opera por debajo de 1,23 V (reacción espontánea).

2.2 Reformado y pirólisis

Fórmulas clave

$$C_xH_y + 2xH_2O \rightarrow (y/2 + 2x)H_2 + xCO_2 \qquad CH_4 + 2H_2O \rightarrow 4H_2 + CO_2$$

$$CH_4 + CO_2 \rightarrow 2H_2 + 2CO \text{ (seco, sin aplicación comercial)} \qquad CH_4 \rightarrow 2H_2 + C \text{ (pirólisis)}$$

Temperatura de espontaneidad $T = \Delta H/\Delta S$.

Revisar

En los apuntes de la asignatura la pirólisis usa $\Delta S = 186\,\mathrm{J/(mol\,K)}$ (entropía del CH_4 como entropía de reacción) y da $T = 400\,\mathrm{K}$. Con $\Delta S = 80{,}9\,\mathrm{J/(mol\,K)}$ resulta $\approx 921\,\mathrm{K}$ (ver problema 3).

2.3 Colores

Color	Origen
Gris	Reformado de gas natural ($\approx 10\,\mathrm{kgCO_2/kgH_2}$)
Azul	Fósil con captura y secuestro de CO_2 (CCS)
Verde	Electrólisis con electricidad renovable
Turquesa	Pirólisis de metano (C sólido)
Blanco	Natural, del subsuelo

Umbral de bajo carbono: $\approx 4{,}3\,\mathrm{kgCO_2/kgH_2}$.

Revisar

El marco regulatorio europeo del hidrógeno (documento `06_11_2025 UPM_vf`) no se ha incluido en estos apuntes. Añadirlo tras revisarlo con la asignatura.

3 Vectores energéticos

El H_2 es difícil de almacenar a gran escala. Moléculas con C o N retienen el hidrógeno y facilitan almacenamiento a largo plazo.

Fórmulas clave

$$\text{Sabatier: } CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O \ (\Delta H = -164\,\mathrm{kJ/mol})$$

$$\text{Haber-Bosch: } N_2 + 3H_2 \rightleftharpoons 2NH_3 \ (\Delta H^0 = -46{,}16\,\mathrm{kJ/mol})$$

$$NH_3 + \lambda\,0{,}75(O_2 + 3{,}76N_2) \rightarrow 1{,}5H_2O + (2{,}82\lambda + 0{,}5)N_2 + 0{,}75(\lambda - 1)O_2$$

	Gasolina	Diésel	CNG	H_2	H_2 líq.	NH_3
PCI (MJ/kg)	44,5	43,5	38,1	120,1	120,1	18,8
Densidad (kg/m^3)	698	839	183	17,5	71,1	603
GJ/m^3	31,1	36,4	7,1	2,1	8,5	11,3
T_{ign} (°C)	300	230	450	571	571	651

- **Metano sintético:** catalizador de Ni (más barato), también Ru o Rh.

- **Amoníaco:** marrón (fósil), azul (con CCS), verde (renovable). Combustión limpia de CO_2 pero con riesgo de NO_x, baja velocidad de llama (0,15 m/s) y alta temperatura de ignición.
- **Metanol:** apartado sin desarrollar en los apuntes.

4 Tecnologías de electrolizador

	Alcalino (AEL)	PEM	SOEC	AEM
Electrolito	KOH acuoso	Membrana polimérica	Cerámica (óxido)	Membrana aniónica
Temperatura (°C)	60 – 80	50 – 80	700 – 850	40 – 60
Consumo (kWh/kg)	50 – 55	50 – 58	40 – 45 + calor	52 – 58
Madurez	comercial	comercial	demostración	I+D
Flexibilidad	media	alta	baja	media

Valores orientativos de literatura. [REVISAR]

La SOEC aprovecha calor residual y reduce el consumo eléctrico porque parte de ΔH entra como calor ($T\Delta S$). PEM tolera potencia variable, adecuada para acoplar a renovables; AEL es la tecnología más madura y barata.

5 Pila de combustible

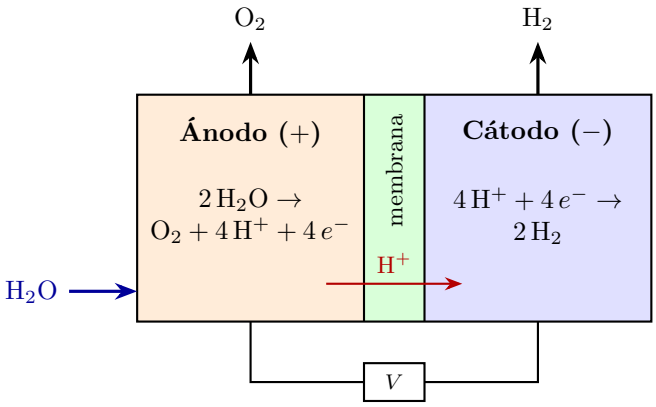


Figura 1. Electrolizador PEM. La corriente eléctrica descompone el agua en oxígeno (ánodo) y en hidrógeno (cátodo), y los protones cruzan la membrana. La pila de combustible hace el proceso inverso y produce electricidad.

Fórmulas clave

$$\mathrm{H_2} + \tfrac{1}{2}\mathrm{O_2} \rightarrow \mathrm{H_2O} \qquad \eta_{pila} = \frac{V_{celda}}{V_{ref}} \qquad V_{ref} = \frac{\Delta H}{nF} \ (\text{PCS: } 1{,}48\,\text{V};\ \text{PCI: } 1{,}25\,\text{V})$$

Tecnologías: PEMFC (baja temperatura, arranque rápido, movilidad), SOFC (alta temperatura, cogeneración), alcalina (AFC). Rendimientos eléctricos reales 40–60 %; la tensión de operación ($\approx$ 0,6–0,8 V) es menor que la reversible por pérdidas de activación, óhmicas y de transporte. El rendimiento round-trip del ciclo H_2 es producto del de electrólisis, almacenamiento y pila.

6 Almacenamiento de hidrógeno

Método	Condiciones	Densidad	Observaciones
Gas comprimido	350 – 700 bar	≈ 24 – $40\,\mathrm{kg/m^3}$	Compresión $\approx$ 1 – 3 kWh/kg
Líquido	20 K, 1 bar	$71\,\mathrm{kg/m^3}$	Licuación $\approx$ 30 % de la energía; *boil-off*
Hidruros metálicos	T y P moderadas	> 100 kg H_2/m^3	Pesados, cinética lenta
Cavernas salinas	60 – 200 bar	gran escala	Estacional; geología
Portadores (NH_3, MeOH, LOHC)	ambiente	ver tabla	Reconversión necesaria

Compresión isoterma de hidrógeno

$$w_{iso} = \frac{R}{M_{H_2}}\, T\, \ln\frac{P_2}{P_1} \quad \text{(gas ideal)} \qquad \frac{R}{M_{H_2}} = 4124\,\mathrm{J/(kg\,K)}$$

El hidrógeno a alta presión se desvía del gas ideal ($Z > 1$), por lo que su densidad real a 700 bar ($\approx 40\,\mathrm{kg/m^3}$) es menor que la ideal ($\approx 57\,\mathrm{kg/m^3}$).

7 Ruta del amoníaco: balance energético

Por cada kg de H_2 se pueden sintetizar $\dfrac{2 \cdot 17{,}03}{3 \cdot 2{,}016} = 5{,}63\,\mathrm{kg}$ de NH_3 (estequiometría de Haber-Bosch). A PCI $= 18{,}8\,\mathrm{MJ/kg}$, el NH_3 contiene $5{,}63 \cdot 18{,}8 = 105{,}9\,\mathrm{MJ}$ frente a $120{,}1\,\mathrm{MJ}$ del kg de H_2: se conserva el 88 % de la energía *sin contar el consumo del proceso* (síntesis a alta P y T, separación de N_2). En contrapartida, el NH_3 se licúa a ≈ 10 bar y 20 °C y tiene $11{,}3\,\mathrm{GJ/m^3}$, más que el H_2 líquido.

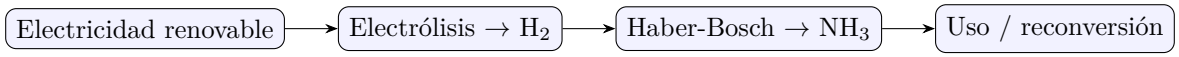


Figura 1. Cadena power-to-ammonia.

8 Termoquímico: más detalle

- **Ventaja principal:** el producto separado puede almacenarse a temperatura ambiente durante meses sin pérdidas; la energía sólo se libera al reponer el reactivo (p. ej. vapor de agua).
- **Densidades:** 200 – 600 $\mathrm{kWh/m^3}$ de material, superiores a sensible y latente.
- **Retos:** cinética y reversibilidad (sinterizado, aglomeración), transferencia de calor y masa en el lecho, compatibilidad con el fluido, y cambio de volumen en ciclos.

Par	ΔH (kJ/mol)	T (°C)	e (Wh/kg)
$Mg(OH)_2 \rightleftharpoons MgO + H_2O$	81	250 – 350	386
$Ca(OH)_2 \rightleftharpoons CaO + H_2O$	104	450 – 550	392

Entalpías de literatura, no de los apuntes. [REVISAR]