Apuntes

Energy Storage

Tema 5: Baterías

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

1 Principio **2**

2 Plomo-ácido **2**

3 Ion-litio **3**

4 Baterías de flujo **4**

5 Sodio-azufre **4**

6 Parámetros y estado de la batería **5**

7 Familias de ion-litio **5**

8 Plomo-ácido y sodio-azufre: aspectos adicionales **6**

9 Baterías de flujo: energía frente a potencia **6**

1 Principio

Una batería almacena energía química y la entrega como eléctrica. Dos electrodos con distinto potencial químico se unen por un electrolito iónico. Con el circuito externo cerrado, los electrones van del potencial más negativo al más positivo y los iones circulan por el electrolito para mantener el balance de carga. Se asocian celdas en serie para subir la tensión y en paralelo para subir la capacidad (Ah).

$$E^0_{celda} = E^0_{\text{cátodo}} - E^0_{\text{ánodo}} \qquad E_{bat} = V \cdot Q \ [\text{Wh}]$$

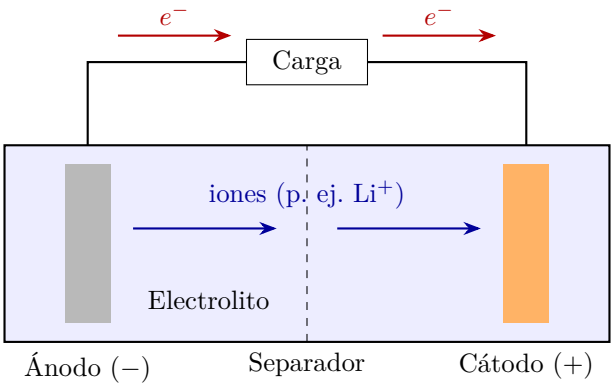


Figura 1. Descarga de una celda: los electrones recorren el circuito externo y los iones cruzan el electrolito del ánodo al cátodo. En la carga todo se invierte.

Semirreacción de reducción	E^0 (V)
$PbO_2 + SO_4^{2-} + 4H^+ + 2e^- \rightarrow PbSO_4 + 2H_2O$	1,69
$CoO_2 + Li^+ + e^- \rightarrow LiCoO_2$	1,00
$VO_2^+ + 2H^+ + e^- \rightarrow VO^{2+} + H_2O$	1,00
$Zn^{2+} + 2e^- \rightarrow Zn$	−0,76
$Li^+ + e^- \rightarrow Li$	−3,04

2 Plomo-ácido

$$Pb + PbO_2 + 2H_2SO_4 \rightleftharpoons 2PbSO_4 + 2H_2O$$

Tensión por celda $\approx 2{,}1$ V. Por encima de $\approx 2{,}39$ V/celda (sobrecarga) se disocia el agua: baja el nivel de electrolito y sube la concentración de ácido, lo que acelera el desgaste.

3 Ion-litio

$$\mathrm{CoO_2} + \mathrm{LiC_6} \rightleftharpoons \mathrm{LiCoO_2} + \mathrm{C_6}$$

Carga de izquierda a derecha, descarga al revés. Cátodos: LCO, LMO, NMC, NCA, LFP, LTO. Modelo equivalente:

Fórmulas clave

$$V_b(t) = V_{OC} - R_s\, i_b(t) - V_c(t) \qquad \frac{dV_c}{dt} = -\frac{V_c}{R_p C_p} + \frac{i_b}{C_p}$$

$i_b > 0$ en descarga. V_{OC} depende del estado de carga. En régimen estacionario, $V_c = R_p i_b$ y $\tau = R_p C_p$.

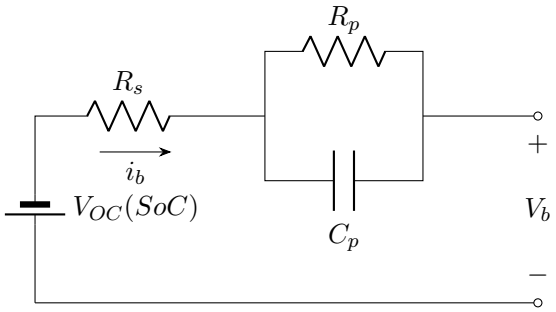


Figura 2. Modelo de Thévenin de primer orden. V_{OC} es la tensión en vacío, R_s la caída instantánea y la rama $R_p C_p$ la respuesta lenta (difusión).

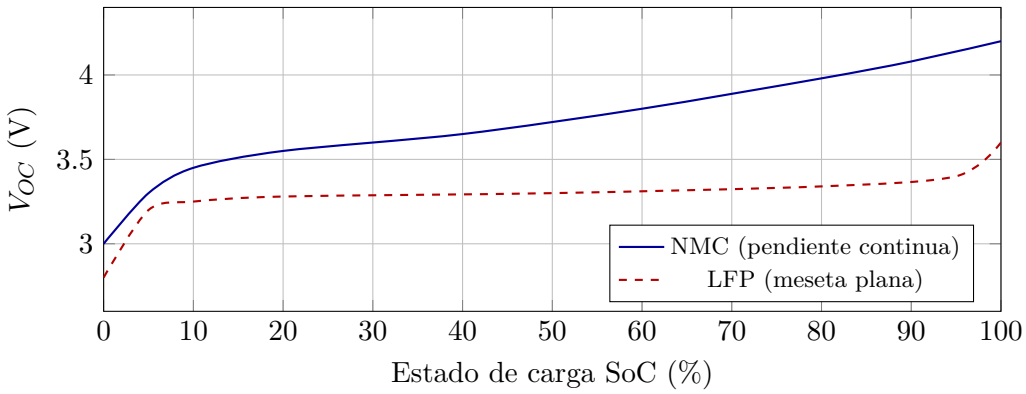


Figura 3. Curvas $V_{OC}(SoC)$ ilustrativas. Con pendiente continua la tensión sirve para estimar el SoC. En la meseta del LFP casi no cambia y hay que contar culombios.

4 Baterías de flujo

Dos electrolitos (anolito y catolito) en tanques separados bombean por una pila con membrana de intercambio iónico. La energía depende del volumen de tanques y la potencia del tamaño de la pila, por lo que se dimensionan por separado.

Fórmulas clave

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF}\ln Q \xrightarrow{25\,^\circ C} E = E^0 - \frac{0{,}05916}{n}\log_{10} Q$$

$$aA + bB \rightleftharpoons cC + dD \;\Rightarrow\; Q = \frac{[C]^c[D]^d}{[A]^a[B]^b}$$

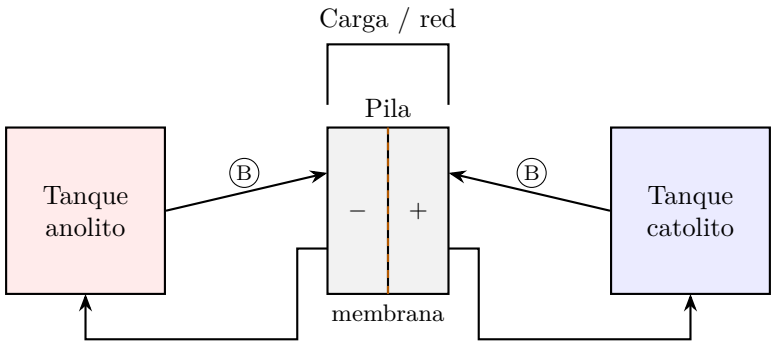


Figura 4. Batería de flujo. La energía está en el volumen de los tanques y la potencia en el tamaño de la pila. Las bombas (B) mueven los electrolitos.

- **Vanadio:** $V^{2+} + VO_2^+ + 2H^+ \rightleftharpoons V^{3+} + VO^{2+} + H_2O$, $E^0 = 1{,}26\,\text{V}$.
- **Fe-Cr** (NASA, años 70) y **Zn-Fe** (ver nota).
- Tensión práctica 1–2,4 V por celda.

Revisar

Los apuntes de la asignatura dan $E^0 = 2{,}3\,\text{V}$ para Zn-Fe con $Fe^{3+}/Fe^{2+} = 0{,}77\,\text{V}$ y $Zn^{2+}/Zn = -0{,}76\,\text{V}$, lo que daría 1,53 V. Comprobar con el profesor.

5 Sodio-azufre

Alta temperatura, η_{RT} 60–75 %, coste de capacidad 907 $/MWh (tema 1). Los apuntes no desarrollan este apartado.

6 Parámetros y estado de la batería

Magnitudes básicas

$$E_{nom} = V_{nom}\, Q_{nom} \qquad C_{rate} = \frac{I}{Q_{nom}} \qquad SoC(t) = SoC_0 - \frac{1}{Q_{nom}} \int_0^t i_b\, dt$$

$$DoD = 1 - SoC \qquad SoH = \frac{Q_{act}}{Q_{ini}} \qquad \eta_{RT} = \eta_{Coul} \cdot \eta_V \ , \quad \eta_{Coul} = \frac{Q_{des}}{Q_{car}}, \ \eta_V = \frac{\bar{V}_{des}}{\bar{V}_{car}}$$

- **Energía específica** (Wh/kg) y **potencia específica** (W/kg). A mayor C-rate, mayor caída de tensión interna ($R_s i_b$) y menos capacidad útil.
- **SoC por conteo de culombios:** integra la corriente. Acumula error por deriva y se corrige con la tensión en circuito abierto $V_{OC}(SoC)$.
- **Dimensionado:** capacidad nominal necesaria $E_{nom} = \dfrac{E_{util}}{DoD_{max} \cdot SoH_{EOL}}$ para garantizar la energía útil al final de la vida.

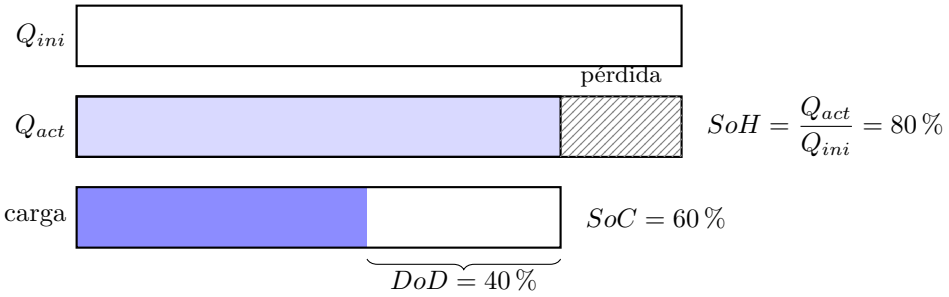


Figura 5. Cómo se relacionan SoH, SoC y DoD. El SoH mide cuánta capacidad queda respecto a la de fábrica. El SoC se mide sobre la capacidad actual.

7 Familias de ion-litio

Cátodo	V_{nom} (V)	Wh/kg	Ciclos	Rasgos
LCO	3,7	150 – 200	500 – 1000	Electrónica de consumo
LMO	3,7	100 – 150	300 – 700	Barata, vida corta
NMC	3,7	150 – 220	1000 – 2000	Vehículo eléctrico, estacionario
NCA	3,6	200 – 260	500 – 1000	Alta energía
LFP	3,2	90 – 160	2000 – 5000	Segura, larga vida
LTO (ánodo)	2,4	70 – 80	>7000	Carga muy rápida

Valores orientativos de literatura (no de los apuntes). [REVISAR]

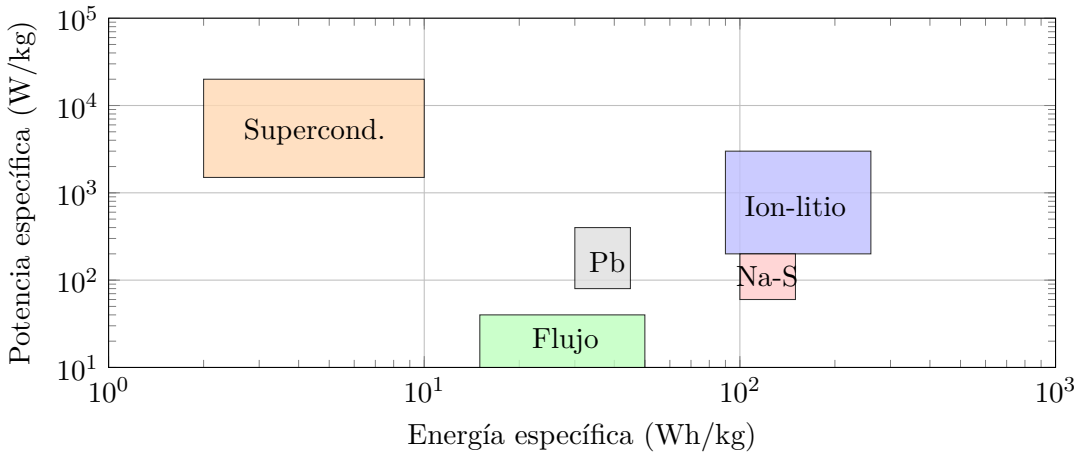


Figura 6. Diagrama de Ragone orientativo (valores típicos de literatura). Arriba a la izquierda quedan los dispositivos de potencia y abajo a la derecha los de energía.

Degradación: crecimiento de la capa SEI (pierde litio activo y sube la resistencia), deposición de litio metálico en cargas rápidas o a baja temperatura, fractura de partículas y disolución del cátodo. Depende de T, SoC medio, C-rate y DoD. **Seguridad:** ante sobrecarga, cortocircuito o calentamiento puede haber fuga térmica (*thermal runaway*); un sistema de gestión (BMS) controla tensión, corriente y temperatura por celda.

8 Plomo-ácido y sodio-azufre: aspectos adicionales

- **Plomo-ácido:** barata y reciclable, pero con DoD recomendado bajo (típicamente 50 %), sulfatación si se mantiene descargada y baja densidad energética ($\approx 30 - -40\,\mathrm{Wh/kg}$).
- **Na-S:** opera a $\approx$ 300–350 °C con electrolito sólido de β-alúmina. Alta densidad de energía y larga vida, pero con requisitos de calentamiento y seguridad. [REVISAR: los apuntes no desarrollan este apartado.]

9 Baterías de flujo: energía frente a potencia

Fórmulas clave

$$e_{electrolito} = \frac{n\,F\,c\,E_{cel}}{3600}\ [\mathrm{Wh/L}] \qquad V_{electrolito} = \frac{E_{util}}{e_{electrolito}\,\eta_V\,\Delta SoC}$$

La energía depende del volumen y concentración de los tanques; la potencia, del área de electrodos y del número de celdas del apilamiento. Se dimensionan por separado, a diferencia de las baterías sellados. Con vanadio ($c = 1{,}6\,\mathrm{M}$, $n = 1$, $E_{cel} = 1{,}26\,\mathrm{V}$) resulta $\approx 54\,\mathrm{Wh/L}$ para el electrolito de un lado, y la mitad para el volumen total (dos tanques). Ventajas: sin degradación del electrolito, miles de ciclos, descarga profunda. Inconvenientes: baja densidad energética, bombeo, crossover a través de la membrana y coste del vanadio.

Idea clave

Elegir tecnología es un compromiso entre densidad (Wh/kg), potencia (W/kg), vida (ciclos), seguridad y coste: plomo-ácido (coste), LFP (vida y seguridad), NMC/NCA (densidad), flujo (larga duración y escalabilidad).