Ejercicios

Gestión Electrónica de la Energía Eléctrica

T3 – Almacenamiento de energía eléctrica

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.

Instrucciones. Diez problemas graduados (puntuación orientativa entre paréntesis, total 10 puntos). Convenio: i_{bat} e i_{sc} positivas en descarga; $SoC = 1 - SoD$; modelo de batería $v_{bat} = v_n - \Delta v \cdot SoD - R_s i_{bat}$. El número de celdas es siempre entero y se redondea **por exceso**.

Revisar

En el material de partida el número de celdas en serie de un bus se redondeaba hacia abajo (70,7 → 70 y 118,8 → 118 en el bus de 270 V), con lo que alguna celda superaba su tensión máxima. En todos los problemas de este documento se usa $N_s = \lceil V_{bus,max}/v_{cel,max} \rceil$ y N_p siempre por exceso.

A. Celda y paquete de baterías (0,5 p)

Una celda de ion-litio tiene $v_n = 3{,}6\,\text{V}$ (a $SoD = 0$), $C = 2{,}6\,\text{A h}$, $\Delta v = 0{,}4\,\text{V}$, $R_s = 35\,\text{m}\Omega$ y admite como máximo 20C.

a) Corriente de 1C, de 3C y corriente máxima de la celda.

b) Tensión en bornes con $SoD = 0{,}6$ descargando a 3C.

c) Energía nominal $v_n C$ y tiempo que tarda en llegar a $SoD = 0{,}8$ a 3C.

d) Se monta un paquete de 5 celdas en serie × 3 ramas en paralelo (5s3p): v_{ocT} a $SoD = 0$, C_T, R_{sT}, energía nominal e I_{max}.

e) Tensión del paquete con $SoD = 0{,}6$ y $i_{bat} = 15{,}6\,\text{A}$.

B. Autonomía de un dron con batería (0,75 p)

Un dron consume periódicamente (periodo de 15 s) 30 W durante 3 s y 6 W durante los 12 s restantes. Lo alimenta una batería de ion-litio de 14,8 V (se supone constante), 3 A h y energía específica 150 Wh/kg. La profundidad de descarga máxima permitida es del 70 %.

a) Potencia media y corriente media de la batería.

b) Autonomía (en horas y minutos) partiendo de batería llena.

c) SoD tras 2 h de vuelo.

d) Masa de la batería.

C. El mismo dron con supercondensadores (1 p)

Se quiere sustituir la batería del problema B por un banco de supercondensadores que dé la misma autonomía con la tensión del banco variando entre $V_{max} = 16\,\text{V}$ y $V_{min} = 8\,\text{V}$ (se desprecia la ESR). Celda: 2,7 V, 10 F, 5 A, 5 g.

a) Energía que debe suministrar el banco y capacidad total C_T necesaria.

b) Número de celdas en serie N_s y en paralelo N_p (redondeo correcto).

c) Masa del banco y comparación con la batería del problema B.

d) Comprobar la corriente de pico a V_{min} (potencia de pico de 30 W).

D. Asociación serie–paralelo (1 p)

a) Paquete de baterías 4s3p con celdas de 3,7 V, 2 A h, $R_s = 40\,\text{m}\Omega$, $\Delta v = 0{,}4\,\text{V}$, 48 g, 20C. Calcular v_{ocT} ($SoD = 0$), C_T, R_{sT}, energía, masa e I_{max}, y la tensión en bornes con $SoD = 0{,}5$ e $i_{bat} = 15\,\text{A}$.

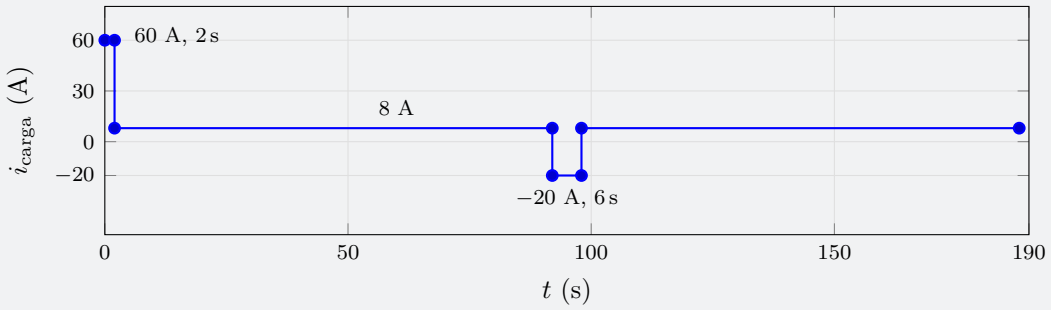
b) Banco de supercondensadores 3s2p con celdas de 2,7 V, 60 F, ESR = 20 mΩ. Calcular C_T, R_{sT}, V_{max} y la energía almacenada. Comprobar que $R_{sT}C_T = R_{cel}C_{cel}$.

c) Con ese banco: energía útil si la tensión sólo puede bajar hasta $V_{max}/2$.

d) Comprobar con las 6 celdas del banco que $E_T = \frac{n}{2}Cv_{sc}^2$ con $n = 6$.

E. Batería para un bus regulado (1,5 p)

Un bus de 48 V ±10 % (43,2 V a 52,8 V) alimenta una carga con el perfil de la figura (positiva = descarga de la batería). La batería se conecta directamente al bus y parte de $SoD_0 = 0{,}5$ y no debe superar $SoD = 0{,}8$ en todo el perfil.



Celda de ion-litio: $v_n = 4{,}2\,\text{V}$ (a $SoD = 0$), $\Delta v = 0{,}6\,\text{V}$, $C = 2\,\text{A h}$, 20C, $R_{cel} = 25\,\text{m}\Omega$, 47 g.

a) Carga neta del perfil.

b) N_s (ninguna celda debe superar v_n con el bus en 52,8 V).

c) N_p mínimo por corriente, por caída de tensión (ESR) y por energía; N_p final.

d) Comprobar que v_{bus} queda dentro de la banda durante todo el perfil y calcular el SoD final.

e) Masa de la batería.

F. Supercondensador para el mismo bus (1,5 p)

Mismo bus y mismo perfil que en E, pero ahora el almacenador es un banco de supercondensadores que parte de 48 V (tensión nominal). Celda: 2,7 V, 120 F, ESR = 8 mΩ, $I_{max} = 40$ A, 16 g.

a) N_s (redondeo correcto).

b) C_T ideal (sin ESR) para no bajar de 43,2 V y N_p resultante.

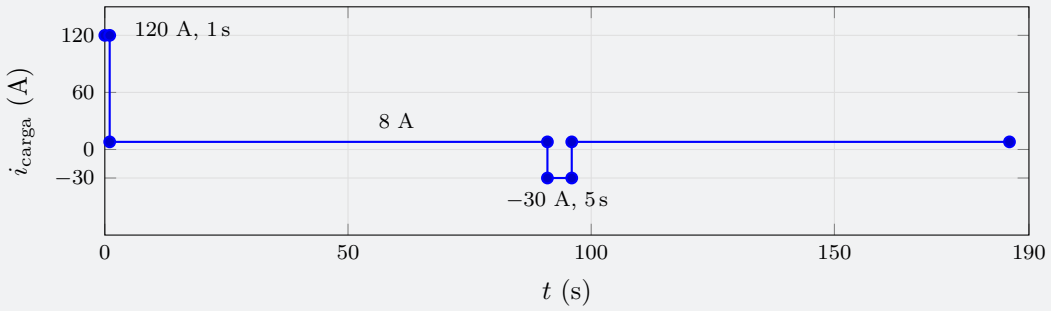
c) N_p mínimo por corriente de pico.

d) Incluyendo la ESR, ¿basta el N_p del apartado b)? Fijar N_p final.

e) Masa del banco y comparación con la batería del problema E.

G. Solución híbrida batería + supercondensador (1,25 p)

El bus de 48 V ±10 % de los problemas E y F pasa a soportar un perfil con un pico más agresivo (figura). Se usan las mismas celdas de batería (E) y de supercondensador (F), con $SoD_0 = 0{,}5$ en la batería.



a) Sólo batería (13 celdas en serie, conectada al bus): N_p necesario y masa.

b) Híbrido: la batería, a través de un DC/DC que fija su corriente en 8 A, aporta el nivel base; el banco de supercondensadores (20 celdas en serie) en el bus absorbe la diferencia. Corriente del banco, y N_p del banco para que la excursión total de v_{bus} no supere los 9,6 V de la banda (la tensión inicial del banco se elige libremente).

c) Dimensionar la batería del híbrido (13 celdas en serie) y calcular la masa total, incluyendo el DC/DC de 500 W/kg dimensionado para la potencia de la batería a 48 V.

d) Dimensionar también el banco de sólo supercondensador para este perfil (parte de 48 V, reglas del problema F) y comparar las tres masas.

H. Masa mínima de una fuente híbrida (1 p)

Una aplicación necesita una energía de 600 W h y una potencia de pico de 2 kW. Se dispone de supercondensadores (8 Wh/kg, 3000 W/kg) y de baterías (150 Wh/kg, 400 W/kg).

a) Masa con sólo baterías y con sólo supercondensadores. ¿Qué restricción limita en cada caso?

b) Plantear el problema de masa mínima de la combinación y resolverlo (intersección de las restricciones).

c) Comprobar potencia y energía de la solución y dibujar la región factible.

I. Carga CC-CV y vida de la batería (0,75 p)

Una batería de 12 A h se carga a corriente constante de 6 A (0,5C) desde $SoC = 0{,}1$ hasta que alcanza la tensión de flotación, lo que ocurre en $SoC = 0{,}8$. A partir de ahí la tensión se mantiene constante y la corriente decae como $i(t) = 6\,e^{-t/\tau}$ con $\tau = 20$ min hasta que $i = 0{,}05\,C = 0{,}6$ A.

a) Duración de la fase CC y de la fase CV.

b) SoC final y carga introducida en la fase CV.

c) Si la batería es de plomo-ácido y dura 8 años a 25 °C, ¿cuánto durará con temperatura media de 45 °C? ¿Y a 35 °C?

d) Rendimiento de un ciclo carga-descarga si $\eta_c = 0{,}96$ y $\eta_d = 0{,}97$.

J. Fin de vida del banco de supercondensadores (0,75 p)

El banco del problema F (20 celdas en serie) debe cumplir el perfil del problema E durante toda su vida. Se considera fin de vida cuando $C = 80\,\%\,C_{ini}$ y $R_{ESR} = 2R_{ESR,ini}$.

a) ¿Cumple al final de vida el banco con el N_p del problema F? Calcular la tensión mínima del bus.

b) Calcular el N_p mínimo para que cumpla al final de vida y la masa resultante.

c) Interpretar: ¿qué margen de diseño supone respecto al caso nuevo?