Resoluciones

Gestión Electrónica de la Energía Eléctrica

T4 – Paneles fotovoltaicos

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

Problema 1 2
Problema 2 3
Problema 3 4
Problema 4 5
Problema 5 6
Problema 6 8
Problema 7 10
Problema 8 12
Problema 9 13
Problema 10 14

Resoluciones paso a paso de los diez problemas de `GEEE_T4_ejercicios`; todos los números están verificados con `calc_T4.py`. Cada enunciado se reproduce antes de su solución.

Problema 1

Problema 1 (0,75 p) — Equivalentes Norton y Thevenin

Un panel se modela con la característica a tramos de datos $I_{sc} = 8{,}0\,\text{A}$, $I_1 = 7{,}5\,\text{A}$, $V_1 = 30\,\text{V}$, $V_{oc} = 36\,\text{V}$ (en adelante, «panel P1»).

a) Dibuja la I–V a tramos y calcula R_N y R_{th}. Escribe $i_p(v_p)$ en cada modo e indica su intervalo de validez.

b) Calcula la potencia máxima del modelo y la resistencia de carga $R_{L,opt}$ que la extrae.

c) La irradiancia baja al 60 %. Suponiendo I_{sc} e I_1 proporcionales a G y V_1, V_{oc} constantes, calcula los nuevos R_N, R_{th}, P_{max} y $R_{L,opt}$.

a) Resistencias del modelo de dos tramos:

$$R_N = \frac{V_1}{I_{sc} - I_1} = \frac{30}{8 - 7{,}5} = \underline{60\,\Omega}$$

$$R_{th} = \frac{V_{oc} - V_1}{I_1} = \frac{36 - 30}{7{,}5} = \underline{0{,}8\,\Omega}$$

- Modo corriente ($0 < v_p < 30$ V, $7{,}5 < i_p < 8$ A): $i_p = 8 - v_p/60$.
- Modo tensión ($30 < v_p < 36$ V, $0 < i_p < 7{,}5$ A): $v_p = 36 - 0{,}8\,i_p$.

b) En el tramo 1, $P = v_p(8 - v_p/60)$ crece hasta V_1 (su máximo teórico estaría en 240 V); en el tramo 2, $P = i_p(36 - 0{,}8 i_p)$ crece hasta I_1 (máximo teórico en 22,5 A). Luego el máximo es el codo:

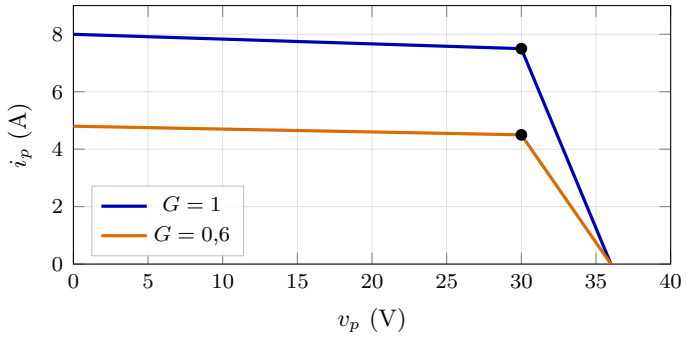
$$P_{max} = V_1 I_1 = \underline{225\,\text{W}} \qquad R_{L,opt} = \frac{V_1}{I_1} = \underline{4\,\Omega}$$

c) Con $I'_{sc} = 4{,}8$ A e $I'_1 = 4{,}5$ A:

$$R'_N = \frac{30}{4{,}8 - 4{,}5} = \underline{100\,\Omega} \qquad R'_{th} = \frac{6}{4{,}5} = \underline{1{,}333\,\Omega}$$

$$P'_{max} = 30 \cdot 4{,}5 = \underline{135\,\text{W}} \qquad (= 0{,}6 \cdot 225)$$

$$R'_{L,opt} = \frac{30}{4{,}5} = \underline{6{,}67\,\Omega}$$



Problema 2

Problema 2 (0,75 p) — Panel conectado directamente a una batería

El panel P1 (problema 1) se conecta directamente a una batería de tensión constante V_{bat}. Para $V_{bat} = 24\,\text{V}$, $33\,\text{V}$ y $38\,\text{V}$:

a) ¿En qué modo trabaja el panel? Calcula i_p y la potencia entregada.

b) Exprésala como porcentaje de la potencia máxima del panel.

c) ¿Qué intervalo de V_{bat} permite extraer al menos el 95 % de P_{max}?

a) Con $v_p = V_{bat}$:

V_{bat}	modo	i_p	P	P/P_{max}
24 V	corriente ($24 < 30$)	$8 - 24/60 =$ 7,6 A	182,4 W	81,1 %
33 V	tensión ($30 < 33 < 36$)	$(36 - 33)/0{,}8 =$ 3,75 A	123,75 W	55,0 %
38 V	$> V_{oc}$: sin corriente	0	0	0 %

b) Ver tabla ($P_{max} = 225$ W).

c) Se exige $P \geq 0{,}95 \cdot 225 = 213{,}75$ W.

Modo corriente:

$$8v - \frac{v^2}{60} = 213{,}75$$

$$v^2 - 480v + 12\,825 = 0$$

$$v = \tfrac{1}{2}\left(480 - \sqrt{179\,100}\right) = 28{,}40\,\text{V}$$

Modo tensión:

$$\frac{v(36-v)}{0{,}8} = 213{,}75$$

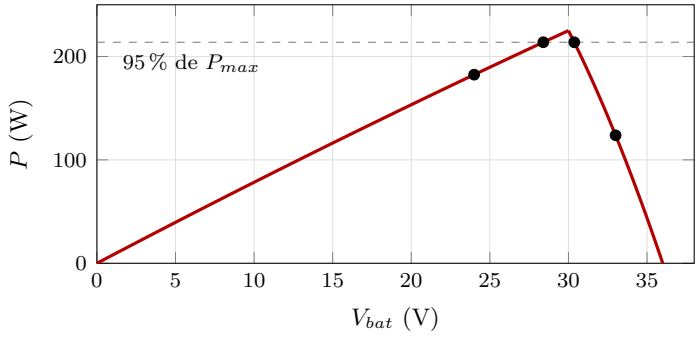
$$v^2 - 36v + 171 = 0$$

$$v = \tfrac{1}{2}\left(36 + \sqrt{612}\right) = 30{,}37\,\text{V}$$

Resultado:

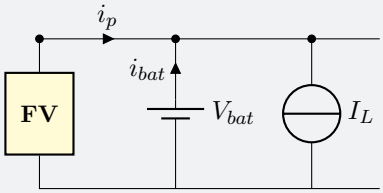
$$\boxed{28{,}40\,\text{V} \le V_{bat} \le 30{,}37\,\text{V}}$$

Es una ventana de sólo 2 V, por lo que la conexión directa casi nunca aprovecha el panel.



Problema 3

Problema 3 (0,75 p) — Batería con carga de corriente y carga de corriente sola



Panel P1. Convenio: $i_{bat} > 0$ cuando la batería se descarga.

a) Con $V_{bat} = 24\,\text{V}$: calcula i_p e i_{bat} para $I_L = 5\,\text{A}$ y para $I_L = 10\,\text{A}$. ¿La batería carga o descarga en cada caso?

b) Sin batería (sólo el panel y la carga de corriente), calcula v_p y la potencia para $I_L = 5\,\text{A}$, $7{,}8\,\text{A}$ y $8{,}5\,\text{A}$.

a) La batería impone $v_p = 24$ V (modo corriente): $i_p = 8 - 24/60 = 7{,}6$ A en ambos casos. KCL: $i_p + i_{bat} = I_L$.

- $I_L = 5$ A:

$$i_{bat} = 5 - 7{,}6 = \boxed{-2{,}6\,\text{A}}$$

La batería **se carga** (absorbe $24 \cdot 2{,}6 = 62{,}4$ W).

- $I_L = 10$ A:

$$i_{bat} = 10 - 7{,}6 = \boxed{2{,}4\,\text{A}}$$

La batería **se descarga** (aporta 57,6 W).

b) Sin batería, $i_p = I_L$:

- $I_L = 5$ A$< I_1$: modo tensión,

$$v_p = 36 - 0{,}8 \cdot 5 = \boxed{32\,\text{V}}$$

$$P = 160\,\text{W}$$

- $I_L = 7{,}8$ A$> I_1$: modo corriente,

$$v_p = 60(8 - 7{,}8) = \boxed{12\,\text{V}}$$

$$P = 93{,}6\,\text{W}$$

Es sólo el 42 % de P_{max}: la carga empuja al panel a baja tensión.

- $I_L = 8{,}5$ A$> I_{sc}$: imposible, el panel no puede alimentar la carga.

Problema 4

Problema 4 (0,75 p) — Carga resistiva directa

El panel P1 alimenta directamente una resistencia R_L.

a) Calcula el valor de R_L que separa los modos de trabajo.

b) Para $R_L = 2\,\Omega$ y $R_L = 10\,\Omega$: modo, v_p, i_p y potencia. ¿Qué fracción de P_{max} se aprovecha?

c) ¿Qué R_L extrae la potencia máxima? Compruébalo.

a) Resistencia del codo:

$$R_{knee} = \frac{V_1}{I_1} = \frac{30}{7{,}5} = \boxed{4\,\Omega}$$

Con $R_L < 4\ \Omega$ el panel trabaja en modo corriente y con $R_L > 4\ \Omega$ en modo tensión.

b) $R_L = 2\ \Omega$ (modo corriente):

$$i_p = \frac{8}{1 + 2/60} = \boxed{7{,}742\,\text{A}} \qquad v_p = 15{,}48\,\text{V}$$

$$P = 119{,}9\,\text{W} \qquad (53{,}3\,\%\ \text{de}\ P_{max})$$

$R_L = 10\ \Omega$ (modo tensión):

$$i_p = \frac{36}{0{,}8 + 10} = \boxed{3{,}333\,\text{A}} \qquad v_p = 33{,}33\,\text{V}$$

$$P = 111{,}1\,\text{W} \qquad (49{,}4\,\%)$$

c) $R_{L,opt} = 4\ \Omega$:

$$i_p = \frac{8}{1 + 4/60} = 7{,}5\ \text{A} \qquad v_p = 30\ \text{V}$$

$$P = \boxed{225\,\text{W}} \qquad (100\,\%)$$

Coincide con el codo.

Problema 5

Problema 5 (1,25 p) — MPPT de perturbar y observar

El panel P1 alimenta un convertidor elevador ideal cuya salida está sujeta a una batería de $V_o = 60\,\text{V}$, de modo que $v_p = (1 - d)V_o$. El MPPT parte de $d_0 = 0{,}58$, con $\Delta d = 0{,}02$ y una primera perturbación $+\Delta d$.

a) ¿Qué d corresponde al MPP del modelo?

b) Completa una tabla de 13 iteraciones ($k = 0 \ldots 12$) con d, v_p, i_p, P y la decisión del algoritmo.

c) Describe el régimen permanente: valores de d visitados, potencia en cada uno y potencia media. Compara con $\Delta d = 0{,}01$.

d) Explica por qué el algoritmo es mucho más sensible a un paso hacia $d < d_{mpp}$ que a uno hacia $d > d_{mpp}$.

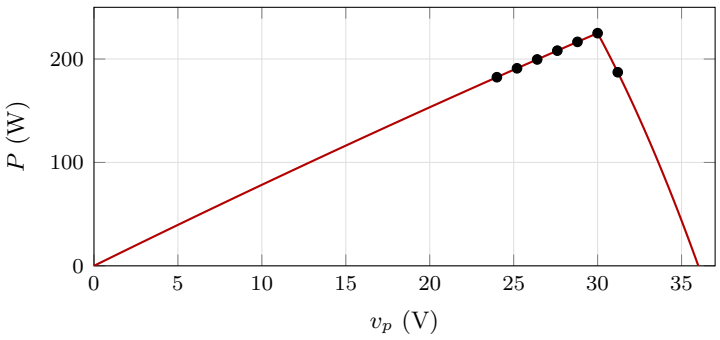
a) MPP en $v_p = V_1 = 30$ V:

$$30 = (1 - d)\,60$$

$$d_{mpp} = \boxed{0{,}50}$$

b) Para cada d: $v_p = (1 - d)60$; si $v_p \le 30$, $i_p = 8 - v_p/60$; si $v_p > 30$, $i_p = (36 - v_p)/0{,}8$; $P = v_p i_p$. Regla: si P sube se mantiene el sentido, si baja se invierte.

k	d	v_p (V)	i_p (A)	P (W)	decisión
0	0,58	25,20	7,580	191,02	perturbo $+\Delta d$
1	0,60	24,00	7,600	182,40	$P\downarrow$: invierto
2	0,58	25,20	7,580	191,02	$P\uparrow$: sigo $(-)$
3	0,56	26,40	7,560	199,58	$P\uparrow$: sigo
4	0,54	27,60	7,540	208,10	$P\uparrow$: sigo
5	0,52	28,80	7,520	216,58	$P\uparrow$: sigo
6	0,50	30,00	7,500	225,00	$P\uparrow$: sigo
7	0,48	31,20	6,000	187,20	$P\downarrow$: invierto
8	0,50	30,00	7,500	225,00	$P\uparrow$: sigo $(+)$
9	0,52	28,80	7,520	216,58	$P\downarrow$: invierto
10	0,50	30,00	7,500	225,00	$P\uparrow$: sigo $(-)$
11	0,48	31,20	6,000	187,20	$P\downarrow$: invierto
12	0,50	30,00	7,500	225,00	$P\uparrow$: sigo $(+)$



c) Régimen permanente: ciclo de 4 pasos $d = 0{,}50 \to 0{,}52 \to 0{,}50 \to 0{,}48$ con potencias 225; 216,58; 225; 187,20 W.

$$\bar{P} = \frac{225 + 216{,}58 + 225 + 187{,}20}{4}$$

$$= \underline{213{,}4\,\text{W}} \qquad (94{,}9\,\%\text{ de } P_{max})$$

Con $\Delta d = 0{,}01$: $d = 0{,}50 \to 0{,}51 \to 0{,}50 \to 0{,}49$ con 225; 220,79; 225; 206,55 W, y media

$$\bar{P} = \underline{219{,}3\,\text{W}} \qquad (97{,}5\,\%)$$

A cambio, llega al MPP en $k = 10$ en vez de $k = 6$ (seguimiento más lento).

d) Para $d > d_{mpp}$ ($v_p < V_1$, modo corriente) i_p casi no cambia (R_N grande) y P cae despacio: $-3{,}7\,\%$ por paso. Para $d < d_{mpp}$ ($v_p > V_1$, modo tensión) i_p cae rápido (R_{th} pequeña): $-16{,}8\,\%$ en un solo paso. La curva P–V es muy asimétrica.

Problema 6

Problema 6 (1,5 p) — Convertidor de potencia constante: puntos de trabajo

Un panel con $I_{sc} = 12\,\text{A}$, $I_1 = 11\,\text{A}$, $V_1 = 40\,\text{V}$, $V_{oc} = 46\,\text{V}$ alimenta un convertidor ($\eta = 95\,\%$) que carga una batería de 48 V con corriente constante de 5 A.

a) Calcula R_N, R_{th} y la potencia de entrada P_{in} del convertidor.

b) Calcula todos los puntos de trabajo válidos (cada modo), descartando razonadamente las raíces absurdas.

c) Impedancia de entrada incremental del convertidor en cada punto.

d) Impedancia de salida (incremental) del panel en cada punto. ¿Cuál de los puntos es estable en continua?

e) Potencia en bornes del panel y potencia de la fuente interna del Thevenin en el punto estable.

a) Resistencias del panel:

$$R_N = \frac{40}{12-11} = \underline{40\,\Omega} \qquad R_{th} = \frac{46-40}{11} = \underline{0{,}5455\,\Omega}$$

Potencias:

$$P_{out} = 48 \cdot 5 = 240\ \text{W} \qquad P_{in} = \frac{240}{0{,}95} = \underline{252{,}6\,\text{W}}$$

Es menos que $V_1 I_1 = 440$ W: el panel puede dárselos.

b) *Modo tensión:*

$$R_{th} i_p^2 - V_{oc} i_p + P_{in} = 0$$
$$0{,}5455\, i_p^2 - 46 i_p + 252{,}63 = 0$$
$$i_p = \frac{46 \pm 39{,}56}{1{,}0909}$$

Raíces: $i_p = 5{,}906\,\text{A}$ (válida, $< I_1$) ó 78,4 A ($> I_{sc}$, absurda). Entonces

$$v_p = \frac{252{,}63}{5{,}906} = 42{,}78\,\text{V} > V_1\ \checkmark$$

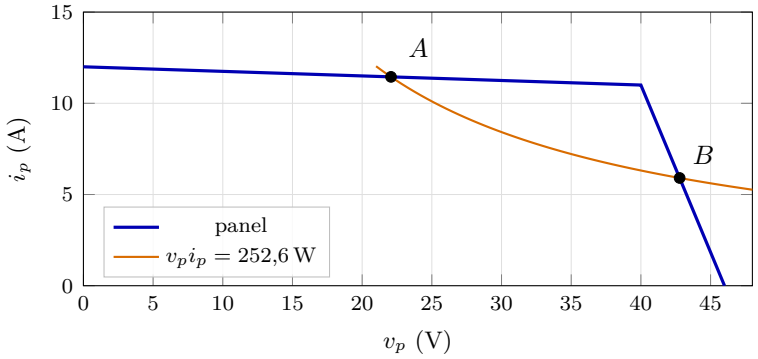
Modo corriente:

$$v_p^2 - R_N I_{sc} v_p + R_N P_{in} = 0$$
$$v_p^2 - 480 v_p + 10\,105 = 0$$
$$v_p = \tfrac{1}{2}(480 \pm 435{,}86)$$

Raíces: $v_p = 22{,}07\,\text{V}$ (válida, $< V_1$; $i_p = 11{,}448$ A$> I_1$ ✓) ó 457,9 V (absurda, $> V_{oc}$).

Puntos de funcionamiento:

$$A: \ (22{,}07\,\text{V},\ 11{,}45\,\text{A}) \qquad B: \ (42{,}78\,\text{V},\ 5{,}906\,\text{A})$$



c) Impedancia de entrada $Z_{in} = -P_{in}/I^2$:

$$A: \ -1{,}93\,\Omega \qquad B: \ -7{,}24\,\Omega$$

d) $Z_{out} = r_p$: en A, $R_N = 40\,\Omega$; en B, $R_{th} = 0{,}545\,\Omega$. Criterio $r_p < |Z_{in}|$:

- A: $40 > 1{,}93$, **inestable**.
- B: $0{,}545 < 7{,}24$, **estable**.

Comprobación: $-1/r_p + P_{in}/V^2$ vale +0,494 S en A y −1,695 S en B.

e) En bornes:

$$P = v_p i_p = \ 252{,}6\,\text{W}$$

En la fuente interna:

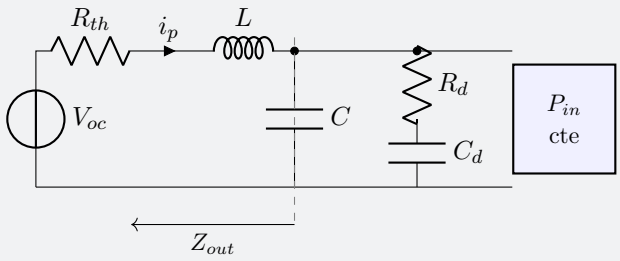
$$V_{oc} i_p = 46 \cdot 5{,}906 = 271{,}7\,\text{W}$$

$$R_{th} i_p^2 = 19{,}0\,\text{W} \quad \text{(se pierden en } R_{th})$$

La potencia «del panel» es la de bornes.

Problema 7

Problema 7 (1,5 p) — Filtro de entrada y criterio de Middlebrook



Panel con $I_{sc} = 10{,}5\,\text{A}$, $I_1 = 10\,\text{A}$, $V_1 = 17\,\text{V}$, $V_{oc} = 18\,\text{V}$, trabajando en modo tensión. Convertidor de potencia constante $P_{in} = 60\,\text{W}$. Filtro: $L = 47\,\mu\text{H}$, $C = 47\,\mu\text{F}$ (en los apartados a–c, sin la rama R_d–C_d).

a) Calcula R_{th}, el punto de trabajo y Z_{in} del convertidor.

b) Expresa $Z_{out}(s)$; calcula Z_0, f_0, Q, el pico aproximado de $|Z_{out}|$ y las frecuencias de corte del Bode asintótico.

c) Estudia la estabilidad con Middlebrook: pico exacto de $|Z_{out}|$ y margen en dB.

d) Se añade la rama de amortiguamiento $R_d = 1\,\Omega$ y $C_d = 4C$ en paralelo con C. Calcula el nuevo pico de $|Z_{out}|$ y el margen.

e) Estima el intervalo de R_d (con $C_d = 4C$) que garantiza el margen de 6 dB.

a) Resistencia térmica equivalente:

$$R_{th} = \frac{18 - 17}{10} = 0{,}1\,\Omega$$

Con potencia constante de 60 W:

$$R_{th} i_p^2 - 18 i_p + 60 = 0$$
$$v_p^2 - 18 v_p + 6 = 0$$
$$v_p = \tfrac{1}{2}\left(18 \pm \sqrt{300}\right)$$

Raíces: $v_p = 17{,}66\,\text{V}$ ($> V_1$, válida) ó 0,34 V (absurda).

$$i_p = \frac{60}{17{,}66} = 3{,}397\,\text{A}$$

$$Z_{in} = -\frac{17{,}66^2}{60} = -5{,}20\,\Omega \qquad (|Z_{in}| = 14{,}32\ \text{dB}\ )$$

b) Impedancia de salida del filtro:

$$Z_{out}(s) = (R_{th} + sL) \parallel \frac{1}{sC}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \boxed{1\,\Omega}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \boxed{3{,}386\,\text{kHz}}$$

$$Q = \frac{Z_0}{R_{th}} = 10$$

$$|Z_{out}|_{pico} \approx \frac{Z_0^2}{R_{th}} = \boxed{10\,\Omega}\ (20\ \text{dB}\ )$$

Bode asintótico de $|Z_{out}|$:

- $\approx R_{th} = 0{,}1\ \Omega$ (-20 dBΩ) hasta $f_{RL} = R_{th}/(2\pi L) = 338{,}6$ Hz.
- Luego ωL ($+20$ dB/dec) hasta f_0 (donde $\omega L = 1\ \Omega$).
- Pico en f_0.
- A partir de f_0, $1/(\omega C)$ (-20 dB/dec).

Valores exactos: 0,104 Ω (100 Hz), 0,382 Ω (10 kHz), 0,0339 Ω (100 kHz).

c) Pico exacto: $10{,}05\,\Omega = 20{,}04$ dBΩ a 3,385 kHz.

$$\text{margen} = 14{,}32 - 20{,}04 = \boxed{-5{,}73\,\text{dB}}$$

Como $|Z_{out}| > |Z_{in}|$ en torno a 3,4 kHz, **no cumple Middlebrook**; el sistema puede ser inestable. (Para margen de 6 dB haría falta $|Z_{out}| < 2{,}60\ \Omega$.)

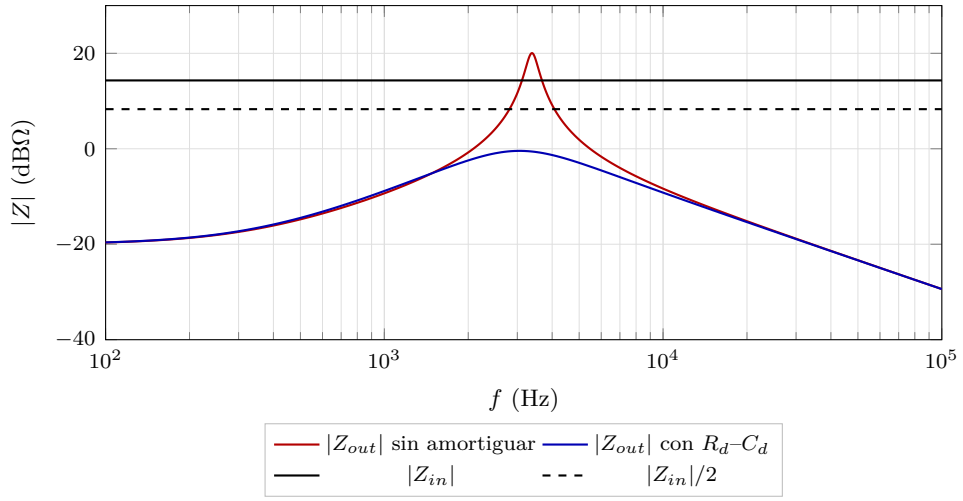
d) Con $R_d = 1\ \Omega$ y $C_d = 4C = 188\,\mu$F, el pico es

$$\boxed{0{,}951\,\Omega} = -0{,}44\,\text{dB}\Omega \quad \text{a } 3{,}05 \text{ kHz}$$

Margen:

$$\text{margen} = 14{,}32 + 0{,}44 = \boxed{14{,}76\,\text{dB}} > 6\ \text{dB}$$

Estable con margen.



e) Barrido numérico de $\max|Z_{out}| < |Z_{in}|/2 = 2{,}60\ \Omega$ con $C_d = 4C$: se cumple para

$$0 < R_d \lesssim \boxed{3{,}49\,\Omega}$$

(con $R_d \to 0$ el filtro tiene $5C$ y pico $\approx 2{,}0\ \Omega$). La regla práctica $R_d \le |Z_{in}|/2 = 2{,}6\ \Omega$ queda del lado seguro. Un valor próximo al óptimo es $R_d \approx 0{,}6\ \Omega$ (pico $0{,}71\ \Omega$).

Problema 8

Problema 8 (0,75 p) — [COMPLEMENTO] Serie y paralelo

Se forma un generador con 3 paneles P1 en serie por rama y 2 ramas en paralelo.

a) Calcula I_{sc}, V_{oc}, V_1, I_1, R_N, R_{th} y P_{max} del conjunto.

b) Conexión directa a una batería de 72 V: modo, i_p y potencia. Repite para 100 V.

a) Con $N_s = 3$, $N_p = 2$:

$$I_{sc} = 2 \cdot 8 = \boxed{16\,\text{A}} \qquad V_{oc} = 3 \cdot 36 = \boxed{108\,\text{V}}$$

$$V_1 = 90\ \text{V} \qquad I_1 = 15\ \text{A}$$

$$R_N = \tfrac{3}{2} \cdot 60 = \boxed{90\,\Omega} \qquad R_{th} = \tfrac{3}{2} \cdot 0{,}8 = \boxed{1{,}2\,\Omega}$$

$$P_{max} = 90 \cdot 15 = \boxed{1350\,\text{W}} \qquad (= 6 \cdot 225)$$

Comprobación con las fórmulas: $90/(16-15) = 90\ \Omega$ y $(108-90)/15 = 1{,}2\ \Omega$.

b) 72 V< 90 V: modo corriente,

$$i_p = 16 - \frac{72}{90} = \boxed{15{,}2\,\text{A}} \qquad P = 1094\,\text{W} \qquad (81{,}1\,\%)$$

100 V> 90 V: modo tensión,

$$i_p = \frac{108 - 100}{1{,}2} = \boxed{6{,}67\,\text{A}} \qquad P = 667\,\text{W} \qquad (49{,}4\,\%)$$

Problema 9

Problema 9 (1,25 p) — Energía diaria con MPPT y dimensionado de la batería

El panel P1 alimenta un convertidor con MPPT ($\eta = 92\,\%$) que carga una batería de 24 V. Suponemos que la potencia máxima del panel es proporcional a la irradiancia, $P_{max}(G) = G \cdot 225\,\text{W}$, con el perfil: 6–8 h, $G = 0{,}2$; 8–10 h, 0,5; 10–16 h, 1,0; 16–18 h, 0,5; 18–20 h, 0,2.

a) Energía diaria extraída del panel y energía que llega a la batería.

b) Capacidad en A·h que debe poder almacenar la batería y corriente máxima de carga.

c) Con celdas de 3 V, 2 A h e $I_{max} = 4\,\text{A}$, dimensiona la batería (serie × paralelo y número total de celdas).

d) A plena irradiancia, compara la potencia que llega a la batería con MPPT frente a conexión directa a los 24 V (problema 2).

a) Horas equivalentes de irradiancia:

$$\sum G\,\Delta t = 0{,}2 \cdot 2 + 0{,}5 \cdot 2 + 1 \cdot 6 + 0{,}5 \cdot 2 + 0{,}2 \cdot 2 = 8{,}8\ \text{h}$$

Energías:

$$E_{panel} = 225 \cdot 8{,}8 = \boxed{1980\,\text{W h}}$$

$$E_{bat} = 0{,}92 \cdot 1980 = \boxed{1821{,}6\,\text{W h}}$$

b) Capacidad y corriente máxima de carga:

$$C = \frac{1821{,}6}{24} = \boxed{75{,}9\,\text{A h}}$$

$$I_{max,carga} = \frac{0{,}92 \cdot 225}{24} = \boxed{8{,}63\,\text{A}}$$

c) Celdas en serie: $24/3 = 8$.

Ramas en paralelo: por capacidad $75{,}9/2 = 37{,}95 \to 38$; por corriente $8{,}63/4 = 2{,}2 \to 3$. Manda la capacidad: 38 ramas.

$$N = 8 \times 38 = \boxed{304 \text{ celdas}} \qquad (8\text{S}38\text{P})$$

Corriente por rama: $8{,}63/38 = 0{,}23$ A.

d) Con MPPT:

$$P_{MPPT} = 0{,}92 \cdot 225 = 207\,\text{W}$$

Directa a 24 V: 182,4 W (problema 2). Ganancia:

$$\text{ganancia} = \frac{207}{182{,}4} = \boxed{+13{,}5\,\%} \qquad (24{,}6 \text{ W})$$

a plena irradiancia, incluso descontando las pérdidas del convertidor.

Problema 10

Problema 10 (0,75 p) — [COMPLEMENTO] Temperatura e irradiancia

Un módulo tiene, en condiciones estándar, $V_{oc} = 37{,}2\,\text{V}$, $I_{sc} = 8{,}6\,\text{A}$ y $P_{mpp} = 232\,\text{W}$, con coeficientes $\alpha_I = +0{,}05\,\%/°\text{C}$, $\beta_V = -0{,}32\,\%/°\text{C}$, $\gamma_P = -0{,}40\,\%/°\text{C}$. Además, V_{oc} varía con la irradiancia como $a \ln G$ con $a = 2{,}0\,\text{V}$. Supón I_{sc} y P_{mpp} proporcionales a G (además de la corrección por temperatura). La temperatura de célula se estima $T_c = T_a + \frac{NOCT-20}{800} G_{[W/m^2]}$ con $NOCT = 45\,°\text{C}$.

a) Con $T_a = 30\,°\text{C}$ y $G = 800\,\text{W/m}^2$: T_c, I_{sc}, V_{oc} y P_{mpp} del módulo.

b) Una cadena en serie debe tener $V_{oc} \le 150\,\text{V}$ a $T_c = -10\,°\text{C}$ y $G = 1$ (despreciando el término $a \ln G$ en $G = 1$). ¿Cuántos módulos como máximo?

a) Temperatura de célula:

$$T_c = 30 + \frac{45-20}{800} \cdot 800 = \boxed{55\,°\text{C}} \qquad (\Delta T = 30 \text{ K})$$

Corriente de cortocircuito:

$$I_{sc} = 8{,}6 \cdot 0{,}8 \cdot (1 + 0{,}0005 \cdot 30) = \boxed{6{,}98\,\text{A}}$$

Tensión en circuito abierto:

$$V_{oc} = 37{,}2(1 - 0{,}0032 \cdot 30) + 2{,}0 \ln 0{,}8 = 33{,}63 - 0{,}45 = \boxed{33{,}18\,\text{V}}$$

Potencia en el MPP:

$$P_{mpp} = 232 \cdot 0{,}8 \cdot (1 - 0{,}004 \cdot 30) = \boxed{163{,}3\,\text{W}}$$

b) Tensión en frío:

$$V_{oc}(-10\,^\circ\text{C}) = 37{,}2(1 + 0{,}0032 \cdot 35) = 41{,}37\,\text{V}$$

Módulos en serie:

$$\frac{150}{41{,}37} = 3{,}63$$

$$N_s = \boxed{3 \text{ módulos}}$$

Con 3 módulos: $3 \cdot 41{,}37 = 124{,}1$ V; con 4 serían 165,5 V$>$ 150 V.