# Guía de estudio

## Gestión Electrónica de la Energía Eléctrica

Guía global T1–T5

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 Plan de estudio por semanas** **2**
1.1 Dónde están los puntos . . . 2
1.2 Calendario sugerido (8 semanas + remate) . . . 2

**2 Mapa conceptual del temario** **4**

**3 Glosario de notación y siglas** **5**
3.1 Notación del profesor . . . 5
3.2 Siglas . . . 5

**4 Las 25 preguntas que más caen** **7**

**5 Errores comunes** **13**
5.1 Los 25 fallos que más puntos cuestan . . . 13
5.2 Erratas y ambigüedades de las fuentes (corregidas en estos apuntes) . . . 14
5.3 Lista rápida antes de entregar un apartado . . . 15

**Resumen**

Material transversal de repaso de *Gestión Electrónica de Energía Eléctrica*: plan de estudio por semanas ajustado al peso real de cada tipo de problema en los exámenes 2014–2021, mapa conceptual del temario, glosario de notación y siglas, las 25 preguntas que más caen con respuesta breve (con cifras verificadas con Python) y una lista de errores comunes. Se complementa con el *Formulario T1–T5*.

# 1 Plan de estudio por semanas

## 1.1 Dónde están los puntos

En las diez convocatorias analizadas (2014–julio 2021) los tipos de problema se reparten así. Desde 2017 el ejercicio de **control (T2)** vale 4–6 puntos de 10 y encadena apartados de 0,5 puntos, de modo que un error pronto arrastra al resto; conviene automatizarlo.

| Tipo de problema | Convocatorias | Qué piden siempre |
|---|---|---|
| Regulador PI por cancelación | 8/10 | $R = \frac{\omega_c}{s} G^{-1}$, Bode de $L$ y $R$, MF |
| Estabilidad en cascada (Middlebrook) | 7/10 | $Z_{in} = -V^2/P$, Bode de $Z_{out}$, amortiguar |
| Dimensionamiento de baterías | 7/10 | $N_s$, $N_p$ por energía $y$ corriente |
| Susceptibilidad / $Z$ en lazo cerrado | 6/10 | $G^{ol}/(1+L)$, rizado a dos frecuencias |
| Panel FV: equivalente y punto de trabajo | 6/10 | Thevenin/Norton, 2.º grado, raíz válida |
| Rectificador: $P$, FP, THD | 4/10 (+2 con carga no lineal) | fundamental con/sin $C_f$ |
| Filtro EMI LC | 3/10 | $\frac{1}{1+LCs^2}$, atenuación a 100 kHz |
| Dimensionamiento de supercondensadores | 3/10 | $\frac{1}{2}C(V_{max}^2 - V_{min}^2)$, $N_s$, $N_p$ |
| Inversor de onda cuadrada a red | 2/10 | armónicos, $P$ sólo del fundamental |

## 1.2 Calendario sugerido (8 semanas + remate)

Pensado para unas 8–10 h/semana. Las semanas se cuentan hacia atrás desde la fecha del examen; si se dispone de menos tiempo, se comprimen las semanas 1–2 (T1 es base, no objetivo) y no se recorta ni la 4 ni la 5.

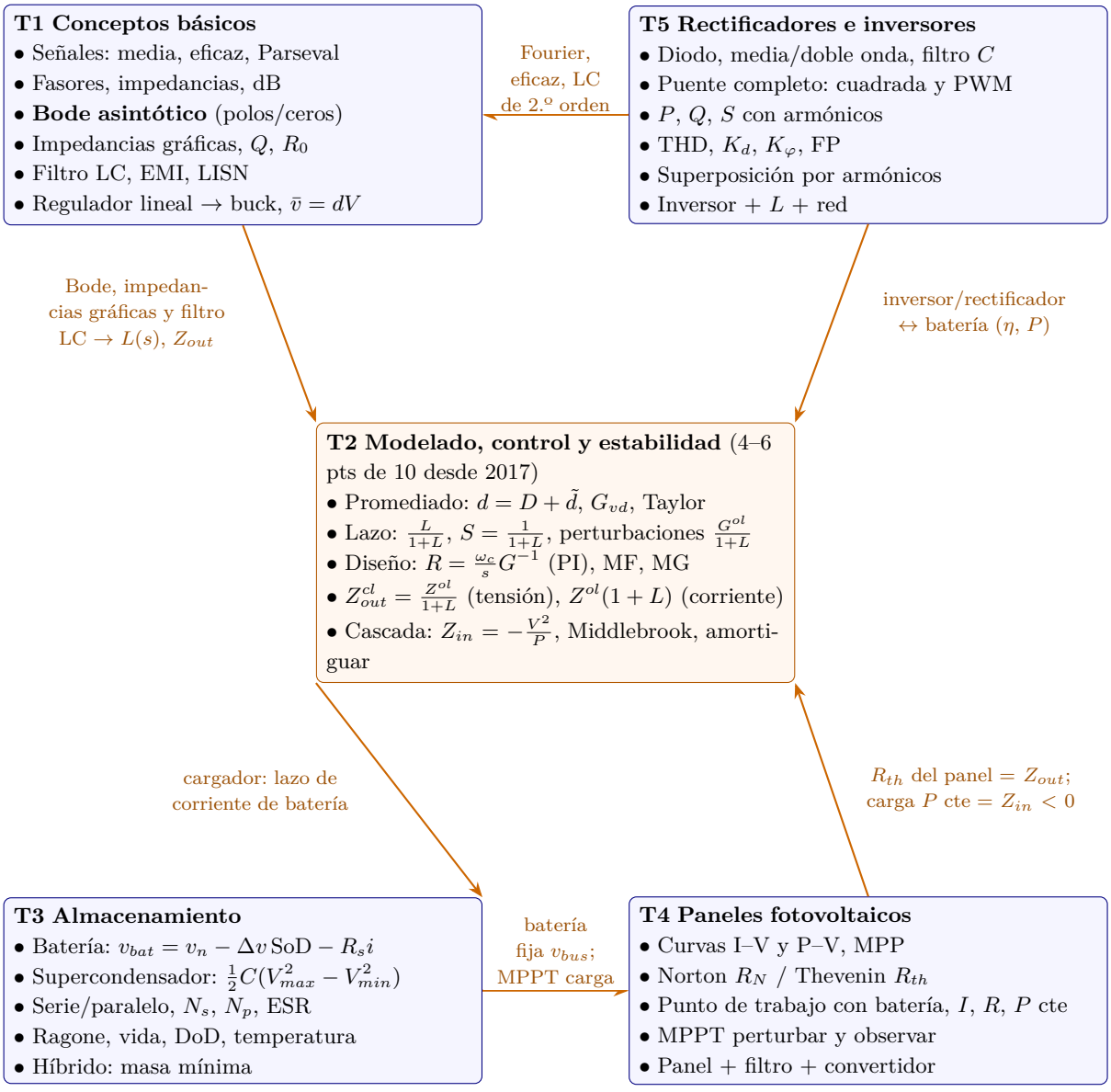
| Semana | Contenido | Tareas | Dominio si... |
|---|---|---|---|
| 1 (8 h) | T1a: valor medio/eficaz, fasores, dB, *Bode asintótico* (polo, cero, origen, doble, SPD) | Trazar 10 Bode a mano (módulo y fase) con 2–3 cortes; leer $\lvert G\rvert$ y $\varphi$ en un punto; salida temporal ante $\sin \omega t$ | Trazas un Bode de 3 cortes en 5 min sin mirar la tabla |

| Semana | Contenido | Tareas | Dominio si... |
|---|---|---|---|
| 2 (8 h) | T1b: impedancias gráficas (R, L, C, serie, paralelo), RLC, $Q$; filtro LC; regulador lineal vs buck; EMI/LISN | 6 impedancias (RLC serie y paralelo, serie–paralelo); filtro LC: $f_0$, $Q$, atenuación a $f_{sw}$ | Distingues $Q = R_0/R$ (serie) de $Q = R/R_0$ (paralelo) |
| 3 (9 h) | T2a: promediado, Taylor, $G_{vd}$, $L/(1+L)$, perturbaciones, $Z^{cl}$; MF y MG | Deducir $\frac{L}{1+L}$ y $\frac{G^{ol}}{1+L}$; leer MF/MG en Bode dados; $Z^{cl} = Z^{ol}/(1+L)$ y $\times(1+L)$ | Explicas por zonas ($f \lessgtr f_c$) sin dudar |
| 4 (10 h) | **T2b: diseño de regulador** (PI por cancelación), Bode de $L$ y $R$, susceptibilidad OL/CL, rizado a dos frecuencias, dibujo temporal | 3 ejercicios completos (corriente $L$–$R$, tensión $RC$, tensión $LC$) con los 8 apartados habituales | Resuelves uno completo en $\leq 45$ min con MF correcto |
| 5 (9 h) | T2c + T4: $Z_{in} = -V^2/P$, Middlebrook, amortiguamiento $R_d$–$C_d$; panel Thevenin/Norton, punto de trabajo, MPPT | 3 ejercicios panel+filtro+convertidor; elegir raíz del 2.º grado; $R_d \leq \lvert Z_{in}\rvert/2$ | Decides estable/inestable mirando $\lvert Z_{out}\rvert$ vs $\lvert Z_{in}\rvert - 6\,\text{dB}$ |
| 6 (8 h) | T3: baterías, supercondensadores, Ragone, vida; dimensionamiento | 4 dimensionamientos (bus regulado, perfil de potencia, SC con ventana, híbrido) | $N_s$, $N_p$ por energía y por corriente sin olvidar el redondeo |
| 7 (8 h) | T5: rectificadores, inversor, $P$–$Q$–$S$, THD, FP, superposición por armónicos | 3 rectificadores (con $C_f$ y $R_p$), 2 inversor+$L$+red, 1 carga no lineal de pulsos | Calculas FP y THD con y sin $C_f$ en 15 min |
| 8 (10 h) | Simulacros cronometrados (2 exámenes completos) + corrección con el solucionario | Un examen con T2 largo, otro con panel + rectificador; anotar errores en la lista de la sección 5 | Puntuación estimada $\geq 7/10$ |
| Remate (2 días) | Formulario, lista de errores, 25 preguntas | Releer P1–P25 en voz alta; rehacer los dos apartados peor resueltos | — |

**Método de estudio**

(1) Resolver sin mirar; (2) comparar con la solución y marcar el *tipo* de fallo (concepto, cálculo, unidades, lectura de Bode); (3) rehacer a los 3 días; (4) cada ejercicio de control termina con una comprobación numérica de $|L(j\omega_c)| = 1$ y de MF. Las soluciones oficiales son manuscritas y contienen erratas (sección 5): comprobar siempre con números.

## 2 Mapa conceptual del temario




**Hilo conductor del temario**

**Modelar** (promediar, linealizar) → **Bode** (módulo y fase asintóticos) → **diseñar** el lazo ($L = \omega_c/s$) → **comprobar la estabilidad en cascada** ($|Z_{out}| < |Z_{in}|/2$) → **dimensionar** el almacenamiento y la etapa de potencia (T3–T5). Casi todo ejercicio de examen recorre ese camino con distinto disfraz (panel, batería, HVDC, rectificador).

# 3 Glosario de notación y siglas

## 3.1 Notación del profesor

| Símbolo | Significado |
|---|---|
| $x = X + \tilde{x}$ | valor total = continua (mayúscula) + pequeña señal (tilde); $d = D + \tilde{d}$ |
| $s$, $j\omega$ | variable de Laplace; en régimen senoidal $s = j\omega$, $\omega = 2\pi f$ (rad/s) |
| $G(s)$, $R(s)$, $L(s)$ | planta, regulador y *ganancia de lazo* $L = RG$ |
| $S = \frac{1}{1+L}$ | sensibilidad (error/referencia) |
| $\omega_c$, $\Delta b_w$, AB | frecuencia de cruce ($\lvert L\rvert = 1$) = ancho de banda del lazo |
| $Z_{out}$, $Z_{in}$, $Y$ | impedancia de salida de la fuente, de entrada de la carga, admitancia |
| $Z_0 = R_0 = \sqrt{L/C}$ | impedancia característica del filtro LC |
| $Q$, $\zeta = \frac{1}{2Q}$ | factor de calidad y amortiguamiento |
| $\lvert X\rvert_{\,\mathrm{dB}}$ | $20\log_{10}\lvert X\rvert$ (dBΩ si es impedancia normalizada a 1 Ω) |
| $I_{sc}$, $V_{oc}$, $(V_1, I_1)$ | cortocircuito, circuito abierto y codo del panel linealizado |
| $R_N$, $R_{th}$ | Norton (modo corriente) y Thevenin (modo tensión) |
| $v_{oc}$, $v_n$, $\Delta v$, $R_s$ | tensión en vacío, nominal, caída entre SoD 0 y 1, resistencia serie (batería) |
| $C$ (Ah) / $C$ (F) | capacidad de una batería / de un supercondensador: no confundir |
| $N_s$, $N_p$ | celdas en serie y ramas en paralelo |
| ef | valor eficaz (RMS); $U_{n,\mathrm{ef}}$ el del armónico $n$ |
| $K_d$, $K_\varphi$ | factor de distorsión $I_1/I_{\mathrm{ef}}$ y de desplazamiento $\cos\varphi_1$ |
| $d_1, d_2$; $f_o$, $f_{sw}$ | señales de puerta del puente; frecuencia de salida y de conmutación |

## 3.2 Siglas

| Sigla | Significado | Para qué sirve / fórmula |
|---|---|---|
| SoC / SoD / DoD | state of charge / discharge, depth of discharge | SoC = 1 − SoD; SoD = Ah entregados/$C$; DoD alto ⇒ menos ciclos |
| C-rate | ritmo de descarga | 1C = capacidad en A; $I_{max} \approx 20C$ |
| OCV, $v_{oc}$ | open-circuit voltage | tensión en vacío de la batería, baja lentamente con SoD |
| ESR, ESL | resistencia / inductancia serie equivalente | limita corriente y rendimiento del supercondensador; $C \cdot \mathrm{ESR} \approx 1\,\mathrm{F\Omega}$ |
| EDLC | electric double-layer capacitor | supercondensador |
| ELD | estimated life duration | vida restante hasta 80 % de $C_{ini}$ |
| VRLA | valve-regulated lead-acid | plomo-ácido; vida ÷2 cada +10°C |
| Ragone | diagrama energía–potencia específicas | $t = E/P$ son rectas diagonales |
| MPP / MPPT | maximum power point / tracker | punto de máxima potencia ≈ codo; seguidor del mismo |

| Sigla | Significado | Para qué sirve / fórmula |
|---|---|---|
| P&O | perturbar y observar | $\Delta P > 0 \Rightarrow$ mismo sentido de $\Delta d$; si no, invertir |
| CPL | constant power load | convertidor regulado: $Z_{in} = -V^2/P < 0$ |
| PWM / SPWM | modulación por ancho de pulso (senoidal) | $\bar{v} = d\,V_{in}$; armónicos en $f_{sw}$ |
| CCM | modo de conducción continua | hipótesis de $V_o = DV_g$ |
| PI | proporcional–integral | $K(1 + \frac{1}{Ts})$: error nulo en CC y cancela un polo |
| MF / MG (PM, GM) | margen de fase / ganancia | $180° + \angle L(\omega_c)$; $-\lvert L\rvert_{\text{dB}}$ a $-180°$ |
| OL / CL | lazo abierto / cerrado (l.a. / l.c.) | $G^{cl} = G^{ol}/(1 + L)$ |
| SPD (RHP) | semiplano derecho | polo $\Rightarrow$ inestable; cero $\Rightarrow$ resta fase |
| THD / DAT | distorsión armónica total | $\sqrt{\sum_{n\geq 2} I_n^2}/I_1$; cuadrada: 48,3 % |
| FP / PF | factor de potencia | $P/S = K_d K_\varphi$ (tensión senoidal) |
| $P, Q, S$ | activa, reactiva, aparente | $S^2 = P^2 + Q^2$ (def. del curso) |
| EMC / EMI | compatibilidad / interferencia electromagnética | emisión + susceptibilidad; conducida: DM y CM |
| DM / CM | modo diferencial / común | fase–neutro / por tierra ($dv/dt$, capacidades parásitas) |
| LISN | line impedance stabilization network | fija 50 Ω a $f > 150$ kHz para medir EMI |
| QP / AV | detector cuasi-pico / promedio | límites EN 55022: 66 → 56 / 56 → 46 dB$\mu$V |
| dB$\mu$V | decibelios sobre 1 $\mu$V | 60 dB$\mu$V = 1 mV |
| PFC | corrección del factor de potencia | boost activo: $i_g \propto v_g$, FP→ 1 |
| UPS / SAI | sistema de alimentación ininterrumpida | rendimiento menor con carga no lineal |
| HVDC | transporte de CC en alta tensión | ejemplo de lazo de corriente $L$–$R$ |
| PUE | power usage effectiveness | potencia total del CPD / potencia IT → 1 |
| FC, PEMFC, SOFC | pila de combustible; de membrana; de óxido sólido | pérdidas: activación, óhmica, transporte de masa |

# 4 Las 25 preguntas que más caen

La etiqueta entre corchetes indica en cuántas de las 10 convocatorias 2014–2021 aparece el tipo de problema. Todas las cifras de los ejemplos se han comprobado con Python (`calc/calc_guia.py` y `calc/calc_formulario.py`).

## Control y estabilidad (T2)

**P1. ¿Cómo diseñas el regulador para un ancho de banda dado y error nulo en continua?** [8/10]

Se impone $L = \omega_c/s$: $R(s) = \frac{\omega_c}{s}\frac{1}{G(s)}$, de modo que $|L|$ cae $-20\,\text{dB/dec}$ y cruza 0 dB en $\omega_c$, con MF$= 90°$ y MG$= \infty$. Para $G = \frac{G_0}{1+s/\omega_p}$ resulta un PI $K(1 + \frac{1}{Ts})$ con $T = 1/\omega_p$ y $K = \frac{\omega_c}{G_0\omega_p}$ (válido con $\omega_c > \omega_p$).

Ejemplo: $G_0 = 50$, $f_p = 200\,\text{Hz}$, $f_c = 5\,\text{kHz}$.

$$K = \boxed{0{,}5} \qquad\qquad T = \boxed{0{,}796\,\text{ms}}$$

Comprobado $|L| = 1$ en 5 kHz y MF$= 90{,}0°$.

**P2. ¿Por qué un integrador puro $R = k/s$ no sirve con una planta de un polo y por qué un P tampoco?** [8/10]

Con $R = k/s$ el módulo cae $-20\,\text{dB/dec}$ por el integrador y otros $-20\,\text{dB/dec}$ tras el polo de la planta: cruza 0 dB con $-40\,\text{dB/dec}$ y fase cercana a $-180°$, margen nulo o inestable. Un P deja error estático ($|L|$ plano en baja frecuencia). La solución es el PI: el cero devuelve la pendiente a $-20\,\text{dB/dec}$.

**P3. ¿Cómo afecta una perturbación en lazo cerrado y cómo se calcula el rizado?** [6/10]

$G^{cl} = G^{ol}/(1 + L)$: para $f < f_c$ vale $\approx G^{ol}/L$ (atenuada); para $f > f_c$, $\approx G^{ol}$. El rizado es $A|G^{cl}(jf_O)|\sin(2\pi f_O t + \angle G^{cl})$; se pasa dB a lineal.

Ejemplo: $L = \omega_c/s$ con $f_c = 5\,\text{kHz}$ y $f_O = 100\,\text{Hz}$.

$$\left|\frac{1}{1+L}\right| = 0{,}020 \qquad (-34\,\text{dB}) \qquad\qquad \angle\frac{1}{1+L} = +89°$$

Con $A = 2\,\text{V}$ y $G^{ol} = 0{,}1$ el rizado es:

$$\hat{v} = 2 \cdot 0{,}1 \cdot 0{,}020 = \boxed{4\,\text{mV}}$$

**P4. ¿Qué es la impedancia de salida en lazo cerrado de un regulador de tensión y de uno de corriente?** [6/10]

Regulador de tensión: $Z^{cl} = \frac{Z^{ol}}{1+L}$ (baja por debajo de $f_c$: fuente de tensión casi ideal). Lazo de corriente (fuente de corriente): $Z^{cl} = Z^{ol}(1 + L)$ (alta: fuente de corriente casi ideal). Por encima de $f_c$ ambas coinciden con $Z^{ol}$.

**P5. ¿Qué ancho de banda conviene elegir y qué se sacrifica al subirlo?** [8/10]

Mayor $\omega_c \Rightarrow |S| = |1/(1 + L)|$ desplazada a la derecha: mejor seguimiento ($L = \omega_c/s$: $|e| = 0{,}1r$ a $0{,}1\omega_c$, $0{,}71r$ en $\omega_c$, $r$ a $10\omega_c$) y mejor rechazo de perturbaciones, e impedancias

$Z^{cl}$ más bajas (tensión) o más altas (corriente) en más rango. A cambio, el ruido de medida pasa igual que la referencia ($\frac{L}{1+L}$), el esfuerzo de control $u \approx r/G$ crece donde $|G|$ es pequeña (saturación) y hay que dejar margen con los retardos de conmutación: $f_c \lesssim f_{sw}/10$.

**P6. Enuncia y justifica el criterio de Middlebrook.** [7/10]
Una fuente con $Z_{out}$ alimenta una carga $Z_{in}$: $\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1+Z_{out}/Z_{in}}$, que diverge si $Z_{out}/Z_{in} = -1$. Condición suficiente y conservadora: $|Z_{out}| < \frac{1}{2}|Z_{in}|\ \forall f$, es decir $|Z_{out}|_{\text{dB}} < |Z_{in}|_{\text{dB}} - 6\,\text{dB}$. Alternativa menos restrictiva: MF y MG de $Z_{out}/Z_{in}$.

**P7. ¿Por qué un convertidor regulado tiene $Z_{in}$ negativa y cuánto vale?** [7/10]
Con $P_{in}$ constante, $v = P_{in}/i$ y $\frac{dv}{di} = -\frac{P_{in}}{I^2} = -\frac{V^2}{P_{in}}$: si la tensión sube, la corriente baja. Se usa $P_{in} = P_{out}/\eta$.

Ejemplo: 28 V, 60 W de salida, $\eta = 0{,}9$.

$$P_{in} = \frac{60}{0{,}9} = 66{,}7\,\text{W}$$

$$Z_{in} = -\frac{28^2}{66{,}7} = \underline{-11{,}76\,\Omega} \qquad (21{,}4\ \text{dB}\ )$$

$$|Z_{out}| < 5{,}88\,\Omega$$

Olvidar $\eta$ da $-13{,}07\,\Omega$.

**P8. Filtro LC de entrada: ¿por qué es inestable sin amortiguar y cómo se arregla?** [3/10]
$Z_{out} = \frac{sL}{1+LCs^2}$ tiene pico infinito en $\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$; con $R$ serie el pico es $\approx Z_0^2/R$ ($R \ll Z_0$; numérico: $R = 0{,}1Z_0 \to 10{,}05\,Z_0$). Se añade $R_d$–$C_d$ con $C_d = 10C$ en paralelo con $C$ (el condensador bloquea la CC, no disipa en continua) o $R_d$–$L_d$ en paralelo con $L$. Óptimo con $n = C_d/C = 10$: $R_d = 0{,}38Z_0$ y pico $0{,}49Z_0$; criterio $R_d \le |Z_{in}|_{\min}/2$.

**P9. ¿Cuánto atenúa un filtro LC un armónico de conmutación?** [3/10]
$\frac{i_g}{i_{in}} = \frac{1}{1+LCs^2} \approx (f_0/f)^2$. Si $f_{sw} = 10f_0$: $-40\,\text{dB}$; si $f_{sw} = 100f_0$: $\underline{-80\,\text{dB}}$ ($\times 10^{-4}$, por ejemplo 5 A→0,5 mA). El pico en $f_0$ es $|Q|_{\text{dB}}$.

## Panel fotovoltaico (T4) y almacenamiento (T3)

**P10. ¿Cómo obtienes el equivalente del panel y su punto de trabajo con un convertidor de potencia constante?** [6/10]

$R_N = \frac{V_1}{I_{sc}-I_1}$ (modo corriente), $R_{th} = \frac{V_{oc}-V_1}{I_1}$ (modo tensión); son las $Z_{out}$ de pequeña señal. Se corta $v_p i_p = P_{in}$ con cada tramo (2.º grado) y se descarta la raíz fuera del tramo.

Ejemplo $I_{sc} = 8$, $I_1 = 7{,}6$, $V_1 = 17$, $V_{oc} = 19$:

$$R_{th} = 0{,}263\,\Omega \qquad\qquad R_N = 42{,}5\,\Omega$$

Con $P_{in} = 100\,\mathrm{W}$:

$$B:\ 17{,}50\,\mathrm{V},\ 5{,}72\,\mathrm{A} \qquad \text{(modo tensión, } Z_{in} = -3{,}06\,\Omega\text{)}$$

$$A:\ 13{,}00\,\mathrm{V},\ 7{,}69\,\mathrm{A} \qquad \text{(modo corriente)}$$

En $A$, $Z_{out} = R_N \gg |Z_{in}| = 1{,}69\,\Omega$: incumple Middlebrook.

**P11. ¿Qué es el MPP y cómo lo busca el MPPT de perturbar y observar?** [6/10]

MPP: máximo de $P = v_p i_p$, aproximadamente en el codo ($P_{mpp} \approx V_1 I_1 = 129{,}2\,\mathrm{W}$ en el ejemplo anterior, comprobado numéricamente); la resistencia óptima es $V_{mpp}/I_{mpp}$. P&O: si $P$ sube se mantiene el sentido de $\Delta d$, si baja se invierte; oscila $\pm\Delta d$ alrededor del MPP. Más luz: $I_{sc}$ sube casi proporcionalmente, $V_{oc}$ casi no cambia.

**P12. Dimensiona una batería para una energía y un pico de potencia.** [7/10]

$N_s = V_{bus}/V_{celda}$; $N_p = \max(\lceil E/(N_s V_c C_c)\rceil, \lceil I_{pico}/I_{max,c}\rceil)$; comprobar $I_{pico} R_s \le \Delta V_{adm}$ con $R_s = R_c N_s / N_p$.

Ejemplo: 48 V, 2 kWh, 6 kW de pico, celda 4 V, 2,5 Ah, 20 A, 30 mΩ.

$$N_s = 12 \qquad\qquad N_{p,energa} = 16{,}7 \to 17$$

$$N_{p,corriente} = 6{,}25 \to 7 \quad (125\ \mathrm{A}) \qquad\qquad N_s,\ N_p = 12,\ 17\ (204\ \text{celdas})$$

$$R_s = 21{,}2\,\mathrm{m\Omega} \qquad\qquad \text{caída} = 2{,}65\,\mathrm{V}$$

**P13. Dimensiona un supercondensador con ventana de tensión.** [3/10]

$E_u = \frac{1}{2} C (V_{max}^2 - V_{min}^2)$ (con DC/DC: $E/\eta$ al descargar); $N_s = \lceil V_{max}/V_c \rceil$; $N_p = \lceil N_s C_T / C_c \rceil$; comprobar $I = P/V_{min}$ por rama y la ESR.

Ejemplo: 20 kJ entre 24 y 12 V, celdas 2,5 V/5 F.

$$C_T = 92{,}6\,\mathrm{F} \qquad\qquad N_s = 10$$

$$N_p = 186 \quad (1860\ \text{celdas})$$

**P14. Baterías frente a supercondensadores.**

Batería: mayor energía específica, $v$ casi constante, 200–1000 ciclos, sensible a temperatura y DoD. Supercondensador: mayor potencia específica, ESR muy baja, $> 10^6$ ciclos, rendimiento 97–98 %, pero $\sim \frac{1}{10}$ de la energía y tensión que varía con la energía: $\text{SoC} = (v/V_R)^2$ (caída del 40 % → SoC 0,36, se usó el 64 %). Se asocian: serie $C_T = C/n$, paralelo $C_T = nC$; en baterías serie mantiene los Ah y paralelo los suma.

**P15. Modelo de batería del profesor y asociación de celdas.**

$v_{bat} = v_n - \Delta v\,\text{SoD} - R_s i_{bat}$ (SoD varía lento; $R_s i$ al instante; $\Delta v \approx 0{,}1 v_n$). $E = v_{oc} C$ (Wh, $C$ en Ah). $R_T = R_c N_s/N_p$, $V = N_s V_c$, $C_{Ah} = N_p C_c$.

**P16. Lee un diagrama de Ragone y la influencia de la temperatura en la vida.**

Ejes log–log energía/potencia específicas; $t = E/P$ son diagonales; pilas arriba a la izquierda, supercondensadores abajo a la derecha. Vida del plomo-ácido: $\text{Vida}(T) \approx \text{Vida}(25°) 2^{-(T-25)/10}$ (50 % a 35°C, 25 % a 45°C); menor DoD ⇒ más energía total en la vida.

## Rectificadores e inversores (T5)

**P17. Calcula $P$, FP y THD de un rectificador a partir de su corriente.** [4/10 + 2]
$P = V_{\text{ef}} I_{1,\text{ef}} \cos\varphi_1$ (sólo el fundamental da potencia, la red es senoidal); $I_{\text{ef}} = \sqrt{\sum I_{n,\text{ef}}^2}$; $FP = P/(V_{\text{ef}} I_{\text{ef}}) = K_d K_\varphi$; $THD = \sqrt{\sum_{n\geq 2} I_n^2}/I_1$.
Ejemplo 230 V, $i = 30\sin(\omega t - 25°) + 9\sin 3\omega t + 4\sin 5\omega t$:

$$P = 4422\,\text{W} \qquad S = 5135\,\text{V A}$$

$$FP = 0{,}861 \qquad (K_d = 0{,}950,\ K_\varphi = 0{,}906)$$

$$THD = 32{,}8\,\%$$

Luego $P_{bat} = \eta P_{rect}$.

**P18. ¿Qué cambia al poner un condensador (o resistencia) en paralelo con la red?**
Sólo el fundamental: $\mathbf{I}_g = \mathbf{I}_{rect} + \mathbf{I}_C + \mathbf{I}_R$; los armónicos no cambian. Con la corriente retrasada del ejemplo anterior y $C_f = 100\,\mu\text{F}$ ($I_C = 7{,}23\,\text{A}$): $|I_{g1}| = 19{,}3\,\text{A}$, $FP = 0{,}937$, $THD = 36{,}1\,\%$ (el FP sube y el THD también). Si $i_{rect}$ va en fase, $|I_{g1}|$ crece: THD 30,0 → 28,4 % pero FP 0,958 → 0,911. $C$ y $L$ no consumen $P$.

**P19. Inversor de onda cuadrada conectado a la red a través de una bobina.** [2/10]
$V_{1,\text{ef}} = \frac{4V_{DC}}{\pi\sqrt{2}}$, $V_n = V_1/n$ (impares). Superposición: $\mathbf{I}^{(1)} = \frac{\mathbf{V}_{inv}^{(1)} - \mathbf{V}_{red}}{j\omega L}$; para $n \neq 1$ la red es un cortocircuito y $I^{(n)} = \frac{V^{(n)}}{n\omega L}$. $P = \text{Re}\{\mathbf{V}_{red}\mathbf{I}^{(1)*}\}$: el signo de $\varphi$ (adelanto/retraso) decide si entrega o absorbe.
Ejemplo $V_{DC} = 100\,\text{V}$, red 80 V/50 Hz, $L = 5\,\text{mH}$, $\varphi = 0$:

$$V_1 = 90{,}03\,\text{V}$$

$$I^{(1)} = 6{,}39\,\text{A} \qquad \text{(reactiva pura, } P = 0)$$

$$I^{(3)} = 6{,}37\,\text{A}$$

**P20. Cuadrada frente a PWM de alta frecuencia en el inversor.**
Cuadrada a $f_o$: fundamental $0{,}900V_{in}$, THD 48,3 %, y el tercer armónico es difícil de filtrar (con $f_c = 1{,}5f_o$ sólo $\times\frac{1}{4}$, $-12\,\text{dB}$). PWM con $f_{sw} > 20f_o$: la media local es senoidal y los armónicos están en $f_{sw}$; basta $f_o \ll f_c \ll f_{sw}$ (menor $f_c$: más atenuación; mayor $f_c$: $L$, $C$ menores). $\hat{V}_{o1} = m_a V_{in}$ ($m_a \leq 1$).

## Fundamentos (T1)

**P21. Traza el Bode asintótico de una $G(s)$ de polos y ceros reales.**
Forma normalizada, nivel CC, cortes ordenados, $\mp 20\,\text{dB/dec}$ por polo/cero, fase $\mp 45°$/dec entre $\omega_i/10$ y $10\omega_i$.
Ejemplo $G = \frac{100(1+s/50)}{(1+s/5)(1+s/2000)}$:

- 40 dB hasta 5 rad/s.
- $-20\,\text{dB/dec}$ hasta 50 (20 dB).
- Plano a 20 dB hasta 2000.
- $-20\,\text{dB/dec}$ después (0 dB en 20 000 rad/s).

Errores reales: $-3\,\text{dB}$ y $\mp 45°$ en cada corte; 1 dB a media y doble frecuencia.

**P22. Impedancias de R, L, C: método gráfico y factor de calidad.**
Serie: domina la mayor $|Z|$; paralelo: la menor. RLC serie ($R > R_0$): $1/\omega C \to R \to \omega L$ con $\omega_1 = \frac{1}{RC}$, $\omega_2 = \frac{R}{L}$; $Q = R_0/R$. Paralelo: $Q = R/R_0$.
Ejemplo $R = 10\,\Omega$, $L = 1{,}4\,\text{mH}$, $C = 500\,\mu\text{F}$:

$$\omega_1 = 200\ \text{rad/s} \qquad \omega_2 = 7143\ \text{rad/s}$$

$$\omega_0 = 1195\ \text{rad/s} \qquad R_0 = 1{,}67\,\Omega$$

$$Q = 0{,}167 \qquad \text{(sobreamortiguado)}$$

**P23. Buck, filtro LC y $G_{vd}$.**
$\bar{v} = d\,V_{bat}$ (se controla con $d$). Un regulador lineal rinde $\eta = V_s/V_e$ ($12 \to 5\,\text{V}$: 41,7 %; $14 \to 3{,}3\,\text{V}$: 23,6 %); el conmutado, idealmente 100 %. $G_{vd} = \frac{V_g}{1+\frac{L}{R}s+LCs^2}$, $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, $Q = R\sqrt{C/L}$; con $f_{sw} = 10 f_0$ el rizado se atenúa $\times\frac{1}{100}$.

**P24. Define margen de fase y de ganancia y léelos sobre un Bode.**
MF$= 180° + \angle L(\omega_c)$ con $|L(j\omega_c)| = 1$; MG$= -|L|_{\text{dB}}$ donde $\angle L = -180°$. $L = \omega_c/s$: MF 90°, MG $\infty$. Cruzar con $-20\,\text{dB/dec}$ es seguro; con $-40\,\text{dB/dec}$, no. Ojo asintótico vs exacto: PI dado $K = 0{,}1$, $T = \frac{1}{2\pi\,1\,\text{kHz}}$ sobre $G = \frac{100}{1+s/2\pi 100}$: asintótico 45°, exacto $\text{MF} = 56{,}3°,\ f_c = 1269\,\text{Hz}$.

**P25. Valores de una señal y EMI (LISN).**
$U_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{1}{T}\int u^2}$ ($P = U_{\text{ef}}^2/R$); Parseval: $U_{\text{ef}}^2 = U_0^2 + \sum U_n^2$; senoide: $U_{\text{ef}} = \hat{U}/\sqrt{2}$, $F_C = \sqrt{2}$, $F_f = 1{,}11$; media onda $\hat{U}/\pi$, doble onda $2\hat{U}/\pi$. EMC = emisión + susceptibilidad; EMI conducida en modo diferencial y común; LISN: $50\,\Omega$ por encima de 150 kHz; EN 55022 B: QP $66 \to 56$, 56, 60 dB$\mu$V.

# 5 Errores comunes

## 5.1 Los 25 fallos que más puntos cuestan

| | Error | Cómo evitarlo |
|---|---|---|
| 1 | Leer cortes en Hz como rad/s (o al revés): $f = \frac{1}{2\pi RC}$ | Anotar siempre $\omega$ o $f$ en el eje; $\omega = 2\pi f$ |
| 2 | $20\log$ en cocientes de potencia, o creer que $20\log 2 = 3\,\text{dB}$ (es 6,02 dB) | $20\log$ para tensión/corriente/impedancia; $10\log$ sólo para $P$ |
| 3 | Olvidar el nivel de baja frecuencia $\lim_{s\to 0} G$ y dibujar 0 dB | Calcular primero $G(0)$ en dB |
| 4 | Sumar mal pendientes tras varios cortes; fase sin solapar tramos | Tabla de cortes y suma acumulada |
| 5 | Serie↔paralelo al dibujar $\lvert Z\rvert$ | Serie: la mayor; paralelo: la menor |
| 6 | $Q = R_0/R$ en un paralelo (o $R/R_0$ en un serie) | Serie $R_0/R$; paralelo $R/R_0$ |
| 7 | Cero en el SPD tratado como cero normal (fase $+90°$) | Resta fase: $-90°$ |
| 8 | Proporcionar $R = k/s$ sobre una planta de un polo | PI: el cero cancela el polo |
| 9 | PI que cancela un polo pero $\omega_c < \omega_p$ | Comprobar $\omega_c > \omega_p$ o rediseñar |
| 10 | Dar sólo el MF asintótico cuando se piden valores exactos (PI dado: $45°$ vs $56°$) | Calcular $\lvert L\rvert = 1$ y $\angle L$ exactos; indicar cuál se da |
| 11 | $Z^{cl} = Z^{ol}/(1+L)$ en una fuente de corriente (es $\times(1+L)$) | Tensión: divide; corriente: multiplica |
| 12 | Aproximar $\frac{1}{1+L}$ por $\frac{1}{L}$ en $f > f_c$ | Por encima de $f_c$ vale $\approx 1$ |
| 13 | Rizado: olvidar pasar dB a lineal o la fase, o usar el lazo equivocado | Elegir ol/cl según $f_O \lessgtr f_c$; dibujar con periodo y desfase |
| 14 | $Z_{in}$ positiva, o con $P_{out}$ en vez de $P_{in} = P_{out}/\eta$ | $Z_{in} = -V^2/P_{in}$ |
| 15 | Middlebrook sin el margen de 6 dB, o comparando $\lvert Z_{out}\rvert$ con $\lvert Z_{in}\rvert$ en lineal/dB mezclados | Pasar ambas a dBΩ y restar 6 dB |
| 16 | Elegir mal la raíz del 2.º grado del panel (o no mirar en qué tramo cae) | Verificar $V_1 < v < V_{oc}$ o $I_1 < i < I_{sc}$ |
| 17 | $R_N$ en modo tensión (o $R_{th}$ en modo corriente) | $R_N$ grande, $R_{th}$ pequeña |
| 18 | Amortiguar con $R_d$ en paralelo con $C$ *sin* $C_d$ en serie: disipa en CC | $R_d$–$C_d$ ($C_d = 10C$) o $R_d$–$L_d$ en paralelo con $L$ |

| | Error | Cómo evitarlo |
|---|---|---|
| 19 | Redondear $N_s$, $N_p$ hacia abajo o dimensionar sólo por energía | Redondear arriba y comprobar $I_{max}$, caída y SoD |
| 20 | Confundir $C$ en Ah con $C$ en F; $C_T = nC$ en serie para SC | SC en serie: $C/n$; batería en serie: igual en Ah |
| 21 | FP $= \cos\varphi$ con corriente distorsionada; mezclar $I_{\text{ef}}$ e $I_1$ en el THD | $FP = P/(V_{\text{ef}} I_{\text{ef}})$, THD con $\sqrt{I_{\text{ef}}^2 - I_1^2}/I_1$ |
| 22 | Calcular $P$ sumando armónicos de órdenes distintos | Sólo mismo orden; red senoidal $\Rightarrow$ sólo el fundamental |
| 23 | Pico vs eficaz en fasores ($\sqrt{2}$); signo de $\varphi$ (entrega/absorbe) | Fasor = eficaz; fijar el convenio $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$ |
| 24 | Con $C_f$ en paralelo recalcular también los armónicos | Sólo cambia el fundamental (suma fasorial) |
| 25 | Errata de unidades (mH/mF, kHz/MHz) que da órdenes de magnitud absurdos | Sanear: $Z_0 = \sqrt{L/C}$, $f_0$ plausible |

## 5.2 Erratas y ambigüedades de las fuentes (corregidas en estos apuntes)

**Revisar**

**Teoría.** (1) Diap. de la bobina: es la *corriente* la que no varía bruscamente. (2) Tabla dB: $20\log 2 = 6\,\text{dB}$ (la diapositiva dice 3 dB, que sería $10\log 2$). (3) Fase en $\omega_p/10$: 5,7° (se escribe 6°). (4) T4 diap. 13: la condición correcta es $R_L < V_{mpp}/I_{mpp}$ (a la izquierda aparece invertida). (5) T3: la diapositiva de supercondensadores en *paralelo* rotula "en serie"; $E_T = \frac{n}{2}Cv^2$ vale en ambas asociaciones. (6) T5/GEEE_18: "la suma de los RMS de los armónicos" es la raíz de la suma de *cuadrados*. (7) T4 diap. 11: el sentido de $i_{bat}$ en la figura y la ecuación $i_{bat} = I_L - i_p$ no coinciden; fijar el convenio (positiva en descarga). (8) Dimensionamiento 270 V: redondear $N_s$ hacia arriba (119–120, no 118); $\Delta V = 28\,\text{V}$ no cumple 27 V; el óptimo híbrido exacto es $0{,}40 + 0{,}996 = 1{,}40\,\text{kg}$ (la diapositiva da 1,5).

**Revisar**

**Soluciones de exámenes.** 2014 P4: nivel bajo de $|Z_{out}|$ es $20\log 0{,}4$ y $f_{res} = 2{,}52 < 6{,}37\,\text{kHz}$. 2015 E2: $f_{res} = 15{,}9$ (no 15,6) kHz. 2015 E3: el signo de $\varphi$ cambia entrega por absorción (más 2753 W si +12,1°). 2016 E1 f: la corriente de rizado está retrasada 90° ($-j/300$), amplitud 16,7 A. 2016 E2: $f_1 = 166{,}7\,\text{kHz}$. Jul 2020: $L_f$ en mH y $\bar{P} = 3{,}7\,\text{W}$. Ene 2021 E1: MF exacto $\approx 56°$ (no 45°). Jul 2021 E2: potencia en bornes del panel 4400 W (no 4527 W).

## 5.3 Lista rápida antes de entregar un apartado

- ☐ ¿Unidades y órdenes de magnitud plausibles? ($Z_0$, $f_0$, rizado en mV/mA...)
- ☐ ¿Bode con ejes rotulados (rad/s o Hz), pendientes, niveles en dB y fase?
- ☐ ¿Comprobado $|L(j\omega_c)| = 1$ y el MF (asintótico o exacto, indicado)?
- ☐ ¿Lazo abierto o cerrado, tensión o corriente, correcto en $Z^{cl}$?
- ☐ ¿Dibujo temporal con periodo, amplitud, desfase y eje de tiempo?
- ☐ ¿Dimensionado redondeado hacia arriba y verificado por energía $y$ corriente?
- ☐ ¿Resultado final con unidades y recuadrado?