Ejercicios

Gestión Electrónica de la Energía Eléctrica

T2 – Modelado y estabilidad

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) sobre el Tema 2: conmutación y filtro LC, linealización y carga de potencia constante, modelo promediado del reductor, criterio de Middlebrook con amortiguamiento y filtro de panel, diseño de reguladores PI/integral, márgenes de fase y ganancia, impedancia de salida en lazo abierto y cerrado. Notación: $d = D + \tilde{d}$, $L(s) = R(s)G(s)$ es la ganancia de lazo y f_c su frecuencia de cruce. Cuando se pide un valor *exacto* se evalúa la función completa; el valor *asintótico* es el que se lee en el Bode de rectas y rampas de $\pm 45°$/década. Se recomienda un entregable por problema con los Bode dibujados a mano en papel semilogarítmico.

Revisar

En las colecciones de problemas de años anteriores el margen de fase de un lazo se daba a veces en su valor asintótico (p. ej. MF $\approx 0°$ o $45°$) cuando el valor exacto es distinto ($11{,}4°$ o $56{,}3°$). En estos ejercicios se indica siempre cuál de los dos se pide; en las resoluciones se dan ambos cuando difieren.

Problema A (0,5 p) – Lineal frente a conmutado

Una fuente de 24 V alimenta una carga de 5 V que consume 2 A.

a) Rendimiento y potencia disipada si se usa un regulador lineal en serie.

b) Con un reductor de rendimiento $\eta = 0{,}92$: potencia de entrada, pérdidas y ciclo de trabajo ideal.

c) Con $f_{sw} = 250\,\text{kHz}$ y $L = 10\,\mu\text{H}$ se quiere $f_0 = f_{sw}/20$. Calcula C, el factor de calidad Q con la carga $R = V_o/I_o$, la atenuación (en dB) de la fundamental del pulso y el rizado pico a pico que resulta (primer armónico).

Problema B (0,5 p) – Linealización y potencia constante

Un convertidor regulado, alimentado a $V_{IN} = 48\,\text{V}$, entrega a su carga $P_o = 150\,\text{W}$ constantes con rendimiento $\eta = 0{,}94$.

a) Corriente de entrada y $Z_{IN} = \tilde{v}_{IN}/\tilde{i}_{IN}$ en ese punto.

b) Escribe $i_{IN}(v_{IN}, P_o)$ y linealiza (Taylor) en el punto: $\partial i_{IN}/\partial v_{IN}$ y $\partial i_{IN}/\partial P_o$.

c) Predice $\tilde{i}_{IN}$ para $\tilde{v}_{IN} = 4\,\text{V}$ con P_o fija y compáralo con el valor exacto (error en %).

d) Repite con $\tilde{v}_{IN} = 4\,\text{V}$ y $\tilde{P}_o = 10\,\text{W}$ a la vez.

Problema C (0,75 p) – Modelo promediado del reductor

Reductor con $V_g = 12\,\text{V}$, $L = 50\,\mu\text{H}$, $C = 200\,\mu\text{F}$, $R = 1\,\Omega$ y $f_{sw} = 100\,\text{kHz}$; salida $V_o = 5\,\text{V}$.

a) D e I_o en el punto de operación.

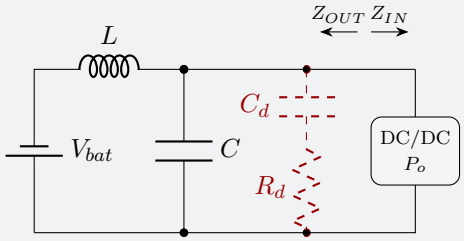
b) $G_{vd}(s) = \tilde{v}_o/\tilde{d}$: f_0, Q, ganancia en continua en dB, valor máximo exacto de $|G_{vd}|$ y fase en f_0.

c) Dibuja el Bode asintótico y calcula el valor exacto de $|G_{vd}(j2\pi f_{sw})|$ en dB.

d) Amplitud de la fundamental del pulso conmutado y rizado pico a pico de v_o (primer armónico); compáralo con $V_g D(1-D)/(8LCf_{sw}^2)$.

Problema D (1,25 p) – Filtro EMI y amortiguamiento

Una batería de $V_{bat} = 28\,\text{V}$ alimenta, a través de un filtro L–C ($L = 47\,\mu\text{H}$, $C = 10\,\mu\text{F}$), un convertidor que entrega $P_o = 250\,\text{W}$ con $\eta = 0{,}92$ (potencia mínima 50 W).



a) Z_{IN} a potencia máxima y límite de Middlebrook (en Ω y en dB); $R_0 = \sqrt{L/C}$ y f_r.

b) ¿Se cumple Middlebrook sin amortiguar?

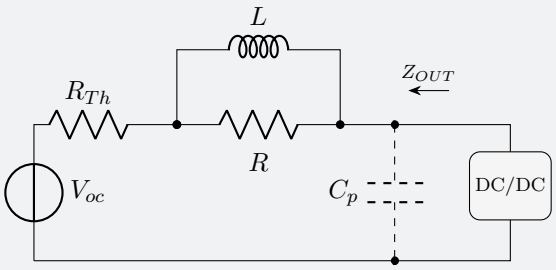
c) Se añade la rama R_d–C_d con $C_d = 4C$ y R_d óptimo (Erickson): R_d, pico de $|Z_{OUT}|$ y veredicto.

d) Valor mínimo (real) de $n = C_d/C$ para cumplir; adopta $n = 8$: R_d, C_d, pico y holgura en dB.

e) Repite la comprobación a potencia mínima (50 W): $|Z_{IN}|$, límite y holgura con $n = 8$. Atenuación (en dB) que el filtro, sin amortiguar, aplica a un armónico de 200 kHz de la corriente i_{IN} (cociente entre la corriente de batería y la de entrada del convertidor).

Problema E (1,25 p) – Panel solar con filtro y Middlebrook

Un panel que trabaja en su zona de caída (equivalente de Thévenin $V_{oc} = 40\,\text{V}$, $R_{Th} = 0{,}5\,\Omega$) alimenta, a través de una bobina $L = 15\,\mu\text{H}$ con una resistencia $R = 20\,\Omega$ en paralelo y un condensador opcional C_p, un convertidor que entrega $P_o = 180\,\text{W}$ con $\eta = 0{,}95$ a potencia constante.



a) Punto de operación (corriente y tensión de entrada) y Z_{IN}.

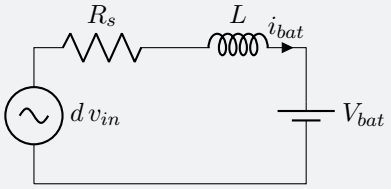
b) Límite de Middlebrook en Ω y en dB.

c) $Z_{OUT} = R_{Th} + (sL \parallel R)$ sin C_p: valor máximo y frecuencia a la que se cruza el límite.

d) C_p por el método gráfico (impedancia de C_p igual al límite en la frecuencia del cruce) y valor mínimo exacto (barrido de $|Z_{OUT}(j\omega)|$). Comenta la diferencia.

Problema F (1,25 p) – Control de corriente de un cargador

La fuente $d\,v_{in}$ ($V_{in} = 48\,\text{V}$) alimenta, a través de $R_s = 0{,}2\,\Omega$ y $L = (1/\pi)\,\text{mH}$, una batería $V_{bat} = 12\,\text{V}$. Un lazo de realimentación unitaria con regulador $R(s)$ controla i_{bat} ($d = D + \tilde{d}$).



a) D, P_o y rendimiento para $I_{bat} = 10\,\text{A}$.

b) $G(s) = \tilde{i}_{bat}/\tilde{d}$: ganancia en continua (dB) y polo.

c) PI $R(s) = K(1 + 1/T_i s)$ que cancela el polo de la planta para $f_c = 2\,\text{kHz}$: T_i, K, MF y MG.

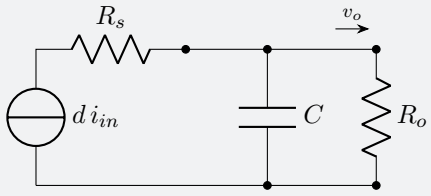
d) Se coloca el cero en 1 kHz con el mismo K: frecuencia de cruce y MF exactos. ¿Qué K da de nuevo $f_c = 2\,\text{kHz}$ y qué MF?

e) Con el diseño del apartado c): $i_{ref}(t) = 10 + \sin(2\pi \cdot 2000\,t)$ A. Expresión de $i_{bat}(t)$ en lazo cerrado.

f) Perturbación $v_{bat} = 12 + 0{,}5\sin(2\pi \cdot 100\,t)$ V: $\tilde{i}_{bat}/\tilde{v}_{bat}$ en lazo abierto y cerrado y amplitud del rizado de i_{bat} en cada caso.

Problema G (1 p) – Control de tensión con fuente de corriente

La fuente $d\,i_{in}$ ($I_{in} = 10\,\text{A}$) alimenta, a través de $R_s = 0{,}1\,\Omega$, el paralelo $C = (2/3\pi)\,\text{mF}$ y $R_o = 1{,}5\,\Omega$. Lazo de tensión de realimentación unitaria ($d = D + \tilde{d}$).



a) D, P_o y rendimiento para $V_o = 9\,\text{V}$.

b) $G(s) = \tilde{v}_o/\tilde{d}$ y su Bode (ganancia en continua en dB y polo).

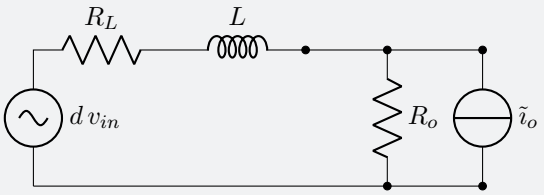
c) Regulador $R_1(s) = K(1 + 1/T_i s)$ con $K = 2/3$ y cero en 5 kHz: Bode asintótico de L_1; frecuencia de cruce y MF exactos.

d) Nuevo cero en el polo de la planta (manteniendo K): f_c y MF.

e) $v_{ref} = 9 + \sin(2\pi f t)$ V: amplitud y fase de v_o para $f = 1\,\text{kHz}$, 5 kHz y 50 kHz con cada regulador.

Problema H (1,5 p) – Regulador integral e impedancia de salida

La fuente $d\,v_{in}$ ($V_{in} = 24\,\text{V}$) alimenta la carga $R_o = 0{,}45\,\Omega$ a través de $R_L = 0{,}05\,\Omega$ y $L = (50/\pi)\,\mu\text{H}$. La corriente de carga tiene una perturbación $\tilde{\imath}_o$ (fuente de corriente en paralelo con R_o). Lazo de tensión con $R(s) = K/s$.



a) D, P_o y η para $V_o = 4{,}5\,\text{V}$.

b) $G(s) = \tilde{v}_o/\tilde{d}$: ganancia en continua en dB y polo.

c) $K = 2\pi \cdot 100\,1/\text{s}$: $L(s)$, frecuencia de cruce y MF exactos.

d) K para $f_c = 1\,\text{kHz}$ exactos; K máximo para $MF \geq 45°$ (exacto).

e) Con $K = 2\pi \cdot 100$ y $v_{ref} = 4{,}5 + \sin(2\pi f t)$: $|\tilde{v}_o/\tilde{v}_{ref}|$ y fase a 1 kHz y 10 kHz.

f) $Z_{OL} = \tilde{v}_o/(-\tilde{\imath}_o)$ y Z_{CL}: valores en continua y alta frecuencia, y en 10 Hz, 100 Hz, 1 kHz, 5 kHz y 50 kHz.

g) $\tilde{\imath}_o = 0{,}5\sin(2\pi \cdot 1000\,t)$ A: rizado de v_o en lazo abierto y cerrado.

Problema I (0,5 p) – Márgenes: lectura asintótica y exacta

La ganancia de lazo de un sistema es $L(s) = \dfrac{2\pi \cdot 300}{s\left(1+\frac{s}{2\pi\cdot 1000}\right)\left(1+\frac{s}{2\pi\cdot 10000}\right)}$.

a) Bode asintótico: frecuencia de cruce, MF y MG leídos con la regla de $\pm 45°$/década.

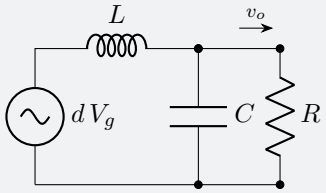
b) Valores exactos de f_c, MF, f_{180} y MG.

c) Si sólo se cambia la ganancia, ¿qué frecuencia de cruce de la parte integradora (f_0 en $2\pi f_0/s\cdots$) da exactamente $MF = 45°$? ¿Qué MG resulta?

d) ¿Y para $MG = 10\,\text{dB}$? ¿Qué MF queda?

Problema J (1,5 p) – Reductor con regulador de dos ceros y dos polos

Reductor con $V_g = 12\,\text{V}$, $L = 40\,\mu\text{H}$, $C = 250\,\mu\text{F}$, $R = 0{,}8\,\Omega$, $f_{sw} = 100\,\text{kHz}$ y $V_o = 5\,\text{V}$. Regulador $R(s) = K\dfrac{(1+s/\omega_z)^2}{s(1+s/\omega_p)^2}$ con $f_z = 1{,}5\,\text{kHz}$ y $f_p = 30\,\text{kHz}$, lazo de tensión de realimentación unitaria.



a) D, $G_{vd}(s)$: f_0, Q, $Z_0 = \sqrt{L/C}$, ganancia en continua y pico máximo (dB).

b) K para que $f_c = 8\,\text{kHz}$ (exacto) y comparación con la estimación asintótica.

c) Con ese K: MF, f_{180} y MG exactos; $|L(j\omega_0)|$.

d) Z_{OL} y Z_{CL}: máximos y frecuencias; valores en 100 Hz y 1 kHz.

e) El reductor alimenta un segundo convertidor de potencia constante que consume 30 W con $\eta = 0{,}9$ a 5 V. Aplica Middlebrook a Z_{OL} y a Z_{CL}.

f) Fundamental del pulso a f_{sw} y rizado pico a pico de v_o en lazo cerrado (primer armónico).