

### PROBLEMAS Y CUESTIONES

1. ¿A qué se debe el tiempo de almacenamiento durante el transitorio de *on* a *off* de un diodo?
2. ¿Qué fenómenos físicos tienen lugar durante los transitorios de un diodo?
3. Explique las señales observadas en el osciloscopio de acuerdo con el montaje propuesto para observar el transitorio del diodo (diapositiva 6).
4. ¿Qué es un diodo Schottky y qué ventajas e inconvenientes ofrece frente a un diodo de unión p-n?
5. Considere un convertor *buck* con los siguientes parámetros:  
 $V_{in} = 10 \text{ V}$ ;  $f_s = 400 \text{ kHz}$ ;  $L = 1 \text{ } \mu\text{H}$ ;  $P_{out} = 10 \text{ W}$ .
  - a) Calcule el valor de  $D$  requerido para obtener  $V_{out} = 2 \text{ V}$ , suponiendo que todos los componentes son ideales.
  - b) Con  $D = 0,2$  calcule el valor real de  $V_{out}$  considerando que se utiliza un diodo Schottky en el que se puede considerar que durante su estado *on* tiene una caída de potencial  $V_{Diodo} = 0,5 \text{ V}$ . (Siga considerando que el transistor es ideal).
  - c) Calcule el valor necesario de  $D$  para obtener realmente  $V_{out} = 2 \text{ V}$ .
  - d) Si no lo ha hecho, verifique que el convertor opera en modo continuo.
  - e) Determine la potencia media disipada en el diodo.
  - f) Calcule la corriente que debe suministrar la fuente de entrada y el rendimiento del convertor.
6. Se va a sustituir el diodo del lado bajo del convertor *buck* del problema anterior por un transistor NMOS. Es decir, se implementará con un convertor de medio puente síncrono. Suponga de momento que el transistor del lado alto sigue siendo ideal. Todos los parámetros del convertor mantienen los valores del problema 5:  $V_{in} = 10 \text{ V}$ ;  $f_s = 400 \text{ kHz}$ ;  $L = 1 \text{ } \mu\text{H}$ ;  $P_{out} = 10 \text{ W}$ ;  $V_{out} = 2 \text{ V}$ .
  - a) Se desea que el rendimiento sea del 95%. Estime el valor máximo de  $R_{DS,on}$  del transistor del lado bajo. (Para este cálculo suponga, como aproximación, que  $D = 0,2$ ).
  - b) Si para el transistor del lado bajo  $R_{DS,on} = 25 \text{ m}\Omega$ , calcule el valor real de  $D$  requerido para que  $V_{out} = 2 \text{ V}$ . (Estrictamente  $V_{DS}$  en el transistor del lado bajo es proporcional a  $i_L$  durante  $t_{off}$ . Para simplificar el cálculo, suponga que es constante e igual a  $R_{DS,on}I_{out}$  (ya que  $I_{out}$  coincide con el valor medio de  $i_L$ ).
  - c) Si los dos transistores del convertor tienen  $R_{DS,on} = 25 \text{ m}\Omega$ , calcule (o estime) el valor de  $D$  requerido para mantener  $V_{out} = 2 \text{ V}$ , estime el rizado de  $i_L$  ( $\Delta i_L$ ) y el rendimiento. (Se sigue manteniendo  $P_{out} = 10 \text{ W}$ ).
7. Considere un convertor *boost* construido con un diodo real y un transistor real. El diodo puede modelarse con una tensión de codo  $V_\gamma = 0,38 \text{ V}$  y una resistencia serie  $R_{Diodo} = 37 \text{ m}\Omega$ . El transistor tiene una resistencia en estado *on*  $R_{DS,on} = 49 \text{ m}\Omega$ . Además,  $V_{in} = 10 \text{ V}$ ;  $f_s = 100 \text{ kHz}$ ;  $L = 5 \text{ } \mu\text{H}$  y la resistencia de carga es  $R_L = 10 \text{ } \Omega$ .
  - a) Evalúe la tensión de salida  $V_{out}$  ideal (es decir, si los componentes fueran ideales) y real, así como la potencia media disipada en  $R_L$ , en el diodo y en el transistor y el rendimiento del convertor si se fija un ciclo de trabajo  $D = 0,8$ .
  - b) Repita los cálculos anteriores si  $D = 0,9$ .
  - c) Repita los cálculos anteriores si  $V_{in} = 25 \text{ V}$  (en vez de  $10 \text{ V}$ ) y  $D = 0,5$ .
8. Para un convertor *buck*, con un diodo ideal y un transistor como interruptor del lado alto, dibuje y explique las formas de onda durante los transitorios de *on* a *off* y viceversa del transistor MOSFET.

**9.** Considere un convertor *buck* construido con un transistor n-MOS como interruptor del lado alto y un diodo ideal en el lado bajo. El transistor tiene los siguientes parámetros:

$V_{TH} = 3,5 \text{ V}$ ;  $k = 8 \text{ AV}^{-2}$ ;  $C_{GS} = 800 \text{ pF}$ ;  $C_{GD} = 40 \text{ pF}$ . Supondremos  $C_{DS}$  despreciable.

La tensión de entrada es de  $20 \text{ V}$  y se ajustará el ciclo de trabajo para que la tensión de salida sea  $5 \text{ V}$ .

La resistencia de carga es  $R_L = 2 \Omega$ .

Se elegirá una  $L$  tal que para la frecuencia de conmutación  $\Delta i_L = 1 \text{ A}$ .

A efectos prácticos, el transistor se activará con un circuito que puede modelarse como una fuente de pulsos con una  $R$  de salida de  $100 \Omega$ , conectada entre G y S, que dará pulsos entre  $0$  y  $12 \text{ V}$ .

En estas condiciones, para los transitorios del MOSFET, se han estimado los siguientes tiempos de retardo característicos:

$t_{d,on} = 28,97 \text{ ns}$ ;  $t_{ri} = 7,296 \text{ ns}$ ;  $t_{fv} = 10,27 \text{ ns}$ ;  $t_{d,off} = 84,93 \text{ ns}$ ;  $t_{rv} = 18,32 \text{ ns}$ ;  $t_{fi} = 18,57 \text{ ns}$ .

a) Suponiendo que el valor de  $D$  es el ideal, estime la potencia disipada en el MOSFET como consecuencia de que durante su conducción  $V_{DS} \neq 0$  (potencia disipada de conducción).

b) ¿A qué frecuencia las pérdidas durante la conmutación representarían un 1% de la potencia de salida?

c) Si se opera con una frecuencia de  $500 \text{ kHz}$ , estime el valor del ciclo de trabajo real que se observará en la fuente del transistor, como consecuencia de sus retardos de conmutación. Considere que el ciclo de trabajo programado es de  $0.4$ . Para evaluar la anchura de pulso de la señal en la fuente del transistor, considere el intervalo desde que la señal está al 50% de su máximo.

**10.** Explique qué pérdidas de potencia pueden darse en un transistor MOSFET que actúa como interruptor.

**11.** Explique cualitativamente el funcionamiento básico del *driver* para un transistor del lado bajo (*low side*) mostrado en la figura 3.

**12.** Explique cualitativamente el funcionamiento básico del *driver* para un transistor PMOS de lado alto (*high side*) mostrado en la figura 4.

**13.** Explique cualitativamente el funcionamiento básico del *driver* para transistor NMOS de lado alto (*high side*) que incluye desplazamiento de nivel y *bootstrap*, mostrado en la figura 5.

**14.** En la hoja de datos de un transistor se especifican los siguientes parámetros:

$R_{\theta JC} = 2,15 \text{ }^\circ\text{C/W}$ ;  $R_{\theta CS} = 0,5 \text{ }^\circ\text{C/W}$ ;  $R_{\theta JA} = 62 \text{ }^\circ\text{C/W}$ .

a) Si la temperatura ambiente es de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , ¿cuál es la máxima potencia que podrá disipar el transistor sin utilizar ningún tipo de radiador si su temperatura de operación no debe superar los  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ?

b) Para una temperatura ambiente de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , se desea que el transistor opere con una  $T$  máxima de  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , disipando una potencia de  $10 \text{ W}$ . ¿Qué resistencia térmica debería tener el radiador utilizado?

**15.** Considere que en un transistor su resistencia en estado *on*  $R_{DS,on}$  crece linealmente con la temperatura, desde  $R_{DS,on} = 60 \text{ m}\Omega$  para  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  hasta  $R_{DS,on} = 200 \text{ m}\Omega$  para  $T = 175 \text{ }^\circ\text{C}$ .

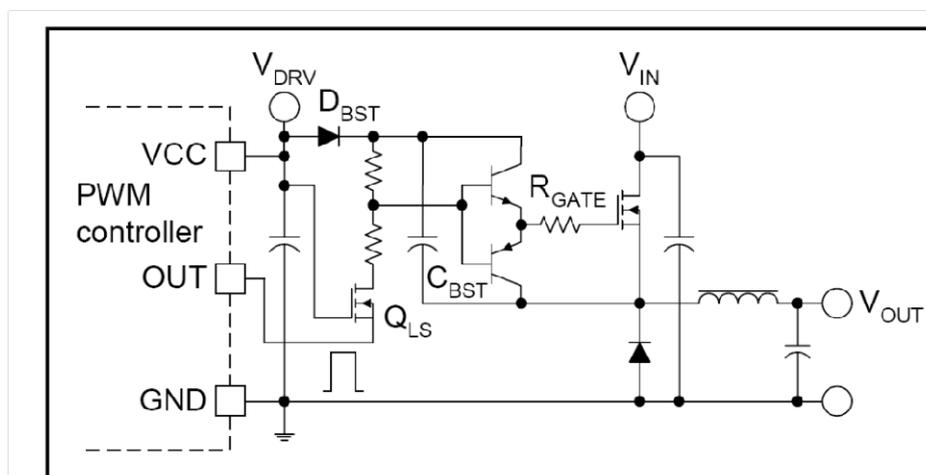
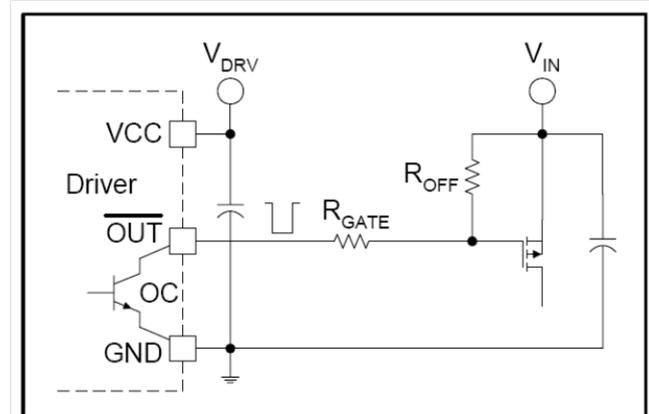
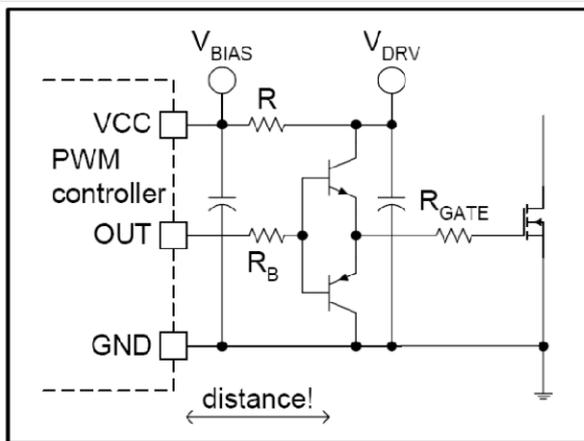
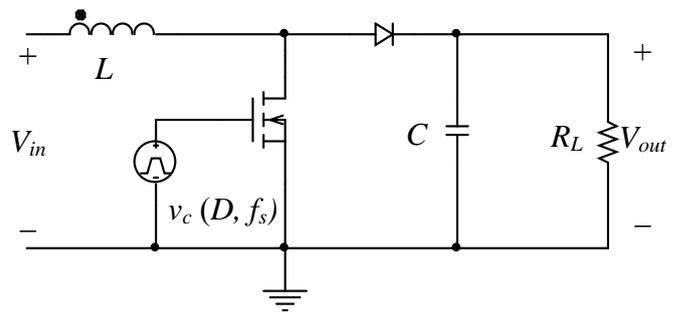
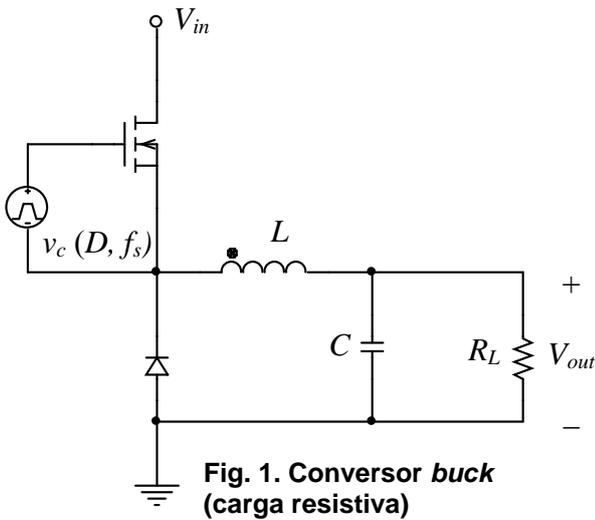
Además:  $R_{\theta JC} = 2,15 \text{ }^\circ\text{C/W}$ ;  $R_{\theta CS} = 0,5 \text{ }^\circ\text{C/W}$ ;  $R_{\theta JA} = 62 \text{ }^\circ\text{C/W}$ .

a) Encuentre una expresión para  $R_{DS,on}$  en función de  $T$  para este transistor.

b) Si el transistor opera en convertor *boost* en el que la corriente media en la inductancia es de  $5 \text{ A}$ , con un rizado despreciable, y el ciclo de trabajo de la señal de control del transistor es  $D = 0,5$ , ¿qué temperatura alcanzaría el transistor si no se utiliza radiador? Considere que  $T_{ambiente} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

c) Si en las condiciones anteriores se desea que el transistor no supere los  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , ¿qué resistencia térmica debería tener el radiador?

FIGURAS



**SOLUCIONES**

1. Visto en clase. (Almacenamiento de portadores minoritarios mientras está en directa. Hasta que no se elimina esa carga, el diodo se comporta como si siguiera en directa, aunque se aplique polarización negativa).

2. Visto en clase. (Dos ideas: todo lo relativo a las poblaciones de minoritarios que se establecen en función de la polarización y el cambio de anchura de la zona de carga espacial).

3-4. Visto en clase.

5. a)  $D = 0,2$

b) Durante  $t_{off}$  (transistor *off* y diodo *on*) la caída de potencial en la inductancia es:  $-V_{Diodo} - V_{out}$ . Al considerar que en estado estacionario la corriente en la inductancia al principio y al final de un periodo debe coincidir implica:  $(V_{in} - V_{out})DT_S - (V_{Diodo} - V_{out})(1 - D)T_S = 0$ . Se obtiene  $V_{out} = 1,6$  V.

c) De la ecuación anterior  $D = 0,238$ .

d) Teniendo en cuenta la corriente en la inductancia durante  $t_{on}$ , se sigue obteniendo:

$$I_{OB} = \frac{DT_S}{2L}(V_{in} - V_{out}) = 2,381 \text{ A} . I_{out} = 5 \text{ A} > I_{OB}.$$

e) La forma de la corriente en el diodo coincide con el tramo descendente lineal de  $i_L$ , durante un tiempo  $(1 - D)T_S$ . Como  $V_{Diodo}$  es constante, se obtiene  $P_{Diodo} = (1 - D)I_{out}V_{Diodo} = 1,905$  W.

f)  $P_{in} = V_{in}I_{in} = P_{out} + P_{Diodo}$ ;  $I_{in} = 1,1905$  A.  $\eta = 0,84$  (84%).

6. a)  $R_{DS,on} \leq 24,98$  mΩ (aquí no se ha despreciado el rizado de la corriente en el transistor al evaluar la potencia disipada).

b)  $D = 0,20988 \approx 0,21$ .

c)  $D = 0,2125$ ;  $\Delta i_L = 4,1836$  A;  $\eta = 93,8\%$ .

7.

	$V_{out}$ ideal (V)	$V_{out}$ real (V)	$\langle i_L \rangle$ (A)	$\Delta i_L$ (A)	$P_{Diodo}$ (W)	$P_{MOS}$ (W)	$P_{RL}$ (W)	Rendimiento (%)
a)	50	44,442	22,22	14,258	5,468	20,020	197,51	88,57
b)	100	67,402	67,40	12,055	19,415	200,88	454,30	67,34
c)	50	48,781	9,756	24,522	15,930	14,927	237,958	88,52

a)  $D = 0,81487$ . (También se obtiene una solución para  $D = 0,9839396$ . Con los elementos elegidos, existe un valor máximo de  $V_o$ , para un cierto  $D$ . Superando este valor de  $D$ , el valor de  $V_o$  disminuye, por lo que, además de un valor de  $D$  ligeramente superior al ideal, se obtiene una solución para un valor de  $D$  cercano a 1. Lo razonable es tomar el valor más pequeño, que además es muy próximo al ideal).

$P_{MOSFET} = 18,289$  W;  $P_{Diodo} = 2,25$  W;  $P_{OUT} = 250$  W;  $\eta = 92,41\%$ .

b)  $V_o = 93,12$  V;  $P_{MOSFET} = 679,51$  W;  $P_{Diodo} = 5,587$  W;  $P_{OUT} = 867,16$  W;  $\eta = 55,86\%$ .

Comentario: Con los niveles de corriente obtenidos en este problema, no es realista suponer que la tensión en el diodo se mantenga fija. Sería más correcto incluir en su modelo también una resistencia en serie, lo cual provocaría que el consumo en el diodo fuera mucho más alto.

8. Visto en clase.

- 9.**
- a)  $P_{MOS,RDS} = 23,3 \text{ mW}$ .
  - b)  $P_{SW} = 1,8915 \times 10^{-6} f_s$ ;  $f_s = 66,1 \text{ kHz}$ .
  - c) El tiempo en *on* se incrementa una cantidad  $\Delta t_{on} = t_{d,off} + t_{rv}/2 - (t_{d,on} + t_{ri} + t_{fv}/2)$ . Tenga en cuenta que para el convertidor del problema, cuando  $v_{DS}$  disminuye,  $v_S$  aumenta. Si  $D_{Programado} = 0,4$  entonces  $D_{Real} = 0,426$ .
- 10.** Visto en clase (pérdidas por  $V_{DS,on} > 0$  durante conducción y pérdidas durante la conmutación).
- 11-13.** Visto en clase.
- 14. a)** Sin radiador  $P_{MAX} = 2,016 \text{ W}$ .
- b)**  $R_{\theta SA} = 4,85 \text{ }^\circ\text{C/W}$ .
- 15. a)**  $R_{DS,on}(T) = 60 + \frac{14}{15}(T - 25) \text{ m}\Omega$  ( $T$  en  $^\circ\text{C}$ ).
- b)**  $T = 193,07 \text{ }^\circ\text{C}$  (probablemente es superior a la máxima  $T$  de operación especificada).
- c)**  $R_{\theta SA} = 21,35 \text{ }^\circ\text{C/W}$ .